

UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS, ENGENHARIAS E
TECNOLOGIAS - UNACET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

JEANINI JIUSTI

DESEMPENHO DE BLINDAGENS HÍBRIDAS
ALUMINA/ALUMÍNIO EM MOSAICO COM MATERIAL DE
PREENCHIMENTO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo

Coorientador: Prof. Dr. Agenor De Noni Júnior

CRICIÚMA
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

J61d Jiusti, Jeanini.

Desempenho de blindagens híbridas alumina/alumínio em mosaico com material de preenchimento / Jeanini Jiusti ; orientador: Oscar Rubem Klegues Montedo, coorientador: Agenor De Noni Júnior. – Criciúma, SC : Ed. do Autor, 2016.

131 p: il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, SC, 2016.

1. Blindagem híbrida. 2. Placa cerâmica. 3. Placas de alumina. 4. Material de preenchimento. I. Título.

CDD. 22^a ed. 620.14

Bibliotecária Rosângela Westrupp – CRB 14º/364
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Jeanini Jiusti

Desempenho de blindagens híbridas alumina/alumínio em mosaico com material de preenchimento.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 04 de março de 2016.

Banca Examinadora:



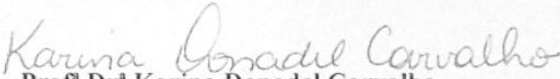
Prof. Dr. Michael Peterson

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Profª Drª Karina Donadel Carvalho

Centro Universitário Barriga-Verde - UNIBAVE

*Aos meus irmãos,
Jéssica e Jonas.*

AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro. À UNESC, por estes últimos cinco anos em que pude atuar sob o auxílio de muitos professores.

Ao Maj. Willian Trindade (IME) pela ajuda nas etapas iniciais da pesquisa. Aos oficiais, Maj. Wesley e 2º Ten. Telles, pelo auxílio prestado no 28ºGAC. Ao Cap. Braido e a Dra. Cristina do Instituto da Aeronáutica e Espaço (IAE). Aos militares que colaboraram na realização dos ensaios balísticos, Sgt. Furiati, Sgt. Santiago, Sgt. Paiva, S Ten. Lima, Ten. Diogo, Cap. Demengeon, e ao T.C. Malizia, que abriu as portas do Centro de Avaliações do Exército (CAEx).

Aos representantes Gabriel Saes da empresa High Vision e Henrique Luís Saues da empresa HBM do Brasil por terem disponibilizado gratuitamente seus equipamentos e pelo trabalho prestado no campo de prova do CAEx.

Aos funcionários do Instituto de Engenharia e Tecnologia - IDT, Augusto Wanderlind, Letícia Ferreira, Juarez Pereira, Tais Dias e Tchésare A. Keller pela ajuda oferecida sempre que necessário. À Kétlin Coelho, do CerTec, pela dedicação nos inúmeros testes que solicitei. Ao professor Bruno do Vale e ao estagiário Igor Hoffmann, do Laboratório de Estruturas, pelos os ensaios realizados e equipamentos disponibilizados. Ao aluno de iniciação científica Eduardo H. Kammer, cujo apoio foi fundamental para esta pesquisa.

Aos professores componentes da banca Michael Peterson, Adriano Michael Bernardin e Karina Donadel Carvalho, pelas importantes contribuições realizadas para melhoria deste trabalho.

A meu orientador, Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo, pela oportunidade, confiança e incentivo durante este período. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Agenor De Noni Jr, pela dedicação prestada desde o ensino médio. Aos professores do PPGCEM e também à Vivian pela substancial cooperação.

Ao meu grande amigo, Mateus Milanez, pelo auxílio como funcionário do IDT, mas principalmente pelo apoio que sempre me deu em todos os momentos de dúvida.

Aos meus colegas e amigos do mestrado, Andriago, Camila, Lisandro, Luana, Monize e Nayadie por compartilharem tantos momentos deste grande passo que demos, que nos fez crescer a cada dia.

Aos meus irmãos Jéssica e Jonas, por todos os momentos especiais que tivemos. Aos meus pais, Luiz e Mariléia, pelas batalhas que tiveram na vida para que eu tivesse esta oportunidade.

A Deus, energia que tornou isso possível.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”

(Mohandas Karamchand Gandhi)

RESUMO

As blindagens híbridas são proteções compostas por placa cerâmica e placa de apoio dútil. A primeira destrói o projétil e a segunda evita a flexão da cerâmica e absorve a energia cinética restante do impacto. Devido ao aperfeiçoamento dos armamentos, as blindagens híbridas tornaram-se necessárias para substituir blindagens metálicas que estavam se tornando muito pesadas para resistirem ao poder de fogo. A alumina é a cerâmica mais comumente empregada em armaduras devido a sua boa relação custo benefício. Painéis balísticos híbridos na forma de mosaicos são empregados com o objetivo de manter o máximo de cerâmica preservada após um impacto. O encaixe entre placas não é perfeito, deixando espaços vazios. As interfaces são vulneráveis ao impacto e, ainda, a expansão da placa atingida pode danificar as adjacentes. Neste trabalho estudou-se a influência de materiais de preenchimento no desempenho balístico de mosaicos. Variou-se a impedância dos mesmos para alterar a quantidade de onda transmitida para as placas adjacentes. O desempenho foi comparado com a placa cerâmica monolítica. Os materiais estudados para preenchimento foram resina epóxi, argamassa de cimento Portland CP V, materiais odontológicos e geopolímero. Placas de alumina de 99% de pureza com 8 mm de espessura foram obtidas de um fornecedor nacional, caracterizadas e comparadas com aluminas balísticas estudadas por outros autores. As placas foram fixadas com adesivo epóxi bicomponente em blocos de alumínio. Quatro diferentes painéis foram montados: (1) monolítico; (2) sem material de preenchimento; (3) material de preenchimento tipo I e (4) tipo II. Os painéis foram submetidos a ensaio balístico DOP com projétil 7,62 mm perfurante. A alumina nacional mostrou características semelhantes à alumina 98% estudada na literatura, indicando que as placas tem qualidade balística, apesar de um pouco inferior a uma alumina de mesma pureza. O estudo dos materiais de preenchimento indicou a resina epóxi pura e o geopolímero com carga de quartzo como as ideias para aplicação nos *gaps*, propiciando 9 e 20% de transmissão de ondas, respectivamente. O teste balístico indicou que a curvatura das placas monolíticas afetou a qualidade da camada adesiva, prejudicando seu desempenho. A placa que apresentava boa planaridade teve boa reposta ao impacto, com diâmetro de dano de 98 mm. O mosaico sem preenchimento foi o que apresentou maior dano nas placas adjacentes. Em uma das amostras, todas as placas adjacentes foram fraturadas. Apesar do dano, não houve

penetração, apenas impressões deixadas pelos fragmentos, sugerindo que a espessura e as dimensões da placa foram suficientes para obstruir o projétil. O emprego do material de preenchimento se mostrou benéfico, pois evitou a expansão da placa atingida, reduzindo o dano nas outras placas. O epóxi, porém, se mostrou mais eficiente, por apresentar maior adesividade e elasticidade. O emprego de geopolímero evitou a expansão da placa porém levou ao descolamento das adjacentes. Para as condições testadas, o mosaico sem preenchimento não apresentou vantagem sobre a placa monolítica. A condição com preenchimento de epóxi apresentou desempenho significativamente maior do que a condição sem preenchimento.

Palavras chave: blindagem híbrida, alumina, mosaico, material de preenchimento.

ABSTRACT

The hybrid armors are composed of ceramic plate and ductile backup plate. The first destroys the projectile and the second prevents the ceramic of bending and absorbs the remaining kinetic energy of the impact. Due to the improvement of weapons, hybrid armors become necessary to replace metal shields that were becoming too heavy to withstand the firepower. Alumina is a ceramic commonly used in armor because of its good cost-benefit. Mosaic hybrid armors are employed in order to keep the maximum of ceramic preserved after an impact. The contact between plates is not perfect, leaving empty spaces. The interfaces are vulnerable to impact and, also, the expansion of the hit plate could damage the adjacent ones. In this work the influence of filling materials in ballistic mosaics on its performance was studied. The acoustic impedance was varied in order to change the amount of transmitted wave to adjacent plates. The performance was compared with the monolithic ceramic plate. The gap filling materials studied were epoxy resin, Portland cement mortar CP V, dental materials and geopolymer. Alumina plates with 99% purity with 8 mm thickness was obtained from a Brazilian supplier, characterized and compared with ballistic aluminas studied by others authors. The plates were bonded with two-component epoxy adhesive in aluminum semi-infinite backup. Four different panels were assembled: (1) monolithic; (2) without filling material; (3) Type I and (4) Type II filling material. The panels were subjected to ballistic testing DOP with 7.62 mm piercing projectile. The studied alumina showed characteristics similar to the 98% alumina of literature, indicating that the plates have ballistic quality, though a little less than an alumina of the same purity. The study of filling material indicated the neat epoxy resin and geopolymer quartz-filled as ideals for application in the gaps, providing 9 and 20 % of wave transmission, respectively. The ballistic test indicated that the curvature monolithic plates affected the quality of the adhesive layer, affecting its performance. The plate that showed good planarity had good response to impact damage with 98 mm diameter. The unfilled mosaic showed the most damage in the adjacent plates. In one sample, all adjacent plates were fractured. Despite the damage, there was no penetration, only impressions left by the fragments, suggesting that the thickness and dimensions of the plate were sufficient to defeat the projectile. The use of filling material was beneficial because it prevented the expansion of the hit tile, reducing the damage to the others. The epoxy, however, proved to be more efficient, because it has greater adhesion and

elasticity. The use of geopolymer prevented the expansion of the tile but led to the detachment of the adjacent ones. For the conditions tested, the unfilled mosaic showed no advantage over the monolithic plate. The epoxy filler with condition had significantly higher performance than the condition unfilled.

Keywords: hybrid armor, alumina, mosaic, filling material.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Blindagem híbrida.....	36
Figura 2 - Densidade superficial necessária para blindagem contra projétil 7,62 mm AP com velocidade de 800 m/s vs. custo relativo da blindagem.....	38
Figura 3 - Módulo de Young vs. dureza por microindentação Vickers para composições com diferentes percentuais de Al_2O_3 (AM: alumina-mulita).....	39
Figura 4 - Ondas de estresse causadas por impacto em um corpo sólido (a) representação esquemática e (b) simulação de elementos finitos. O.C: Ondas de cisalhamento; O.L.: ondas longitudinais; O.S.: ondas superficiais.	42
Figura 5 - Placa utilizada para determinação do coeficiente de atenuação após o impacto (S1, S2 e S3 são os strain-gages colados a 15, 30 e 45 mm do ponto de impacto) e (b) resultados da simulação com diferentes coeficientes de atenuação (pontos experimentais indicados no gráfico).	44
Figura 6 - Representação da formação do cone de fraturas.	46
Figura 7 - Cone de fraturas em blindagem híbrida cerâmica-metal submetida a ensaio balístico.....	46
Figura 8 - Representação esquemática da penetração do projétil na cerâmica já fraturada e (b) radiografia deste instante do impacto.....	47
Figura 9 - Dano na placa de apoio de blindagem híbrida atingida.....	49
Figura 10 - (a) Ilustração de determinação da profundidade e penetração P_r (t_c é a espessura da placa cerâmica); (b) bloco de alumínio perfurado (referência) e (c) placa de apoio perfurada.	50
Figura 11 - Configurações usuais de painéis em mosaico: (a) placas quadradas e (b) placas hexagonais.	51
Figura 12 - Fratura de placas adjacentes (a) mosaico atingido por projétil 7,62 AP e (b) ilustração de mosaico hexagonal antes e após impacto. .	52
Figura 13 - Vista lateral da blindagem com material de preenchimento.	53
Figura 14 - Fluxograma do procedimento experimental empregado. ...	56
Figura 15 - Dimensões das placas de alumina hexagonais empregadas. Para a configuração monolítica $A = 100$ mm e para a configuração em mosaico $A = 30$ mm.	57
Figura 16 - Peças hexagonais seccionadas para montagem do painel...	58
Figura 17 - Representação esquemática das medidas dos corpos de prova para realização do módulo de elasticidade.....	64
Figura 18 - Esquema simplificado do ensaio de flexão em três pontos	65

Figura 19 - Desenho esquemático representando os corpos de prova utilizados para determinação da tenacidade à fratura.....	66
Figura 20 - Mosaicos montados com fita dupla-face.	70
Figura 21 - (a) Provete calibre 7,62 mm e (b) mira laser	71
Figura 22 - Barreira óptica para determinação da velocidade do projétil.	72
Figura 23- Representação em corte de projétil .30 AP M2 (7,62 mm AP).....	73
Figura 24 - Projétil calibre 7,62 mm nacional.....	73
Figura 25 - Posição dos <i>strain-gages</i> nos painéis em mosaico: S1 extremidade da peça, S2 logo após o <i>gap</i> e S3 após o segundo <i>gap</i>	76
Figura 26 - Microindentações Vickers nas amostras de alumina (a) monolítica e (b) mosaico e Knoop em (c) monolítica e (d) mosaico. ...	82
Figura 27 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da superfície fraturada da amostra monolítica.....	84
Figura 28 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da superfície fraturada da amostra mosaico.	85
Figura 29 - Difração de raios-X da amostra em mosaico.....	86
Figura 30 - Deformação na superfície do alumínio após o ensaio balístico - efeito "pétala" (corpo de prova R9).....	91
Figura 31 - Imagens obtidas com a câmera de alta velocidade em intervalos de 41,6 μ s (corpo de prova R9).	91
Figura 32 - Canal de penetração em tarugo seccionado (R5)	92
Figura 33 - Profundidade de penetração vs. velocidade de impacto (m/s)	94
Figura 34 - Corpo de prova MO1 após ensaio balístico.....	95
Figura 35 - Tarugo após remoção da placa cerâmica e corte transversal (a) visão geral e (b) detalhe da cavidade.....	96
Figura 36 - Detalhe do corpo de prova MO1.	97
Figura 37 - Corpo de prova MO2 após ensaio balístico.....	97
Figura 38 - Acúmulo de adesivo em MO2.....	98
Figura 39 - Corpo de prova MO3 após impacto balístico. A seta indica o diâmetro do dano.....	99
Figura 40 - Imagens obtidas com a câmera de alta velocidade em intervalos de 41,6 μ s (corpo de prova MO2).	100
Figura 41 - Imagem de MEV da superfície de fratura da trinca radial.....	100
Figura 42 - Dados obtidos com <i>strain-gages</i> : corpo de prova MO3... ..	101
Figura 43 - Corpo de prova SP1 após ensaio balístico.....	102
Figura 44 - Corpo de prova SP2 após ensaio balístico.....	103

Figura 45 - Corpo de prova SP3 após ensaio balístico.....	104
Figura 46 - Dano na região atingida pelo projétil.	105
Figura 47 - Imagens obtidas com câmera de alta velocidade (corpo de prova SP3).....	105
Figura 48 - Dados obtidos com <i>strain-gages</i> : corpo de prova SP2.....	106
Figura 49 - Corpo de prova EP1 após o ensaio balístico.	107
Figura 50 - Corpo de prova EP2 após o ensaio balístico.	108
Figura 51 - Corpo de prova EP3 após o ensaio balístico.	109
Figura 52 - Dados obtidos com <i>strain-gages</i> : corpo de prova EP2.....	110
Figura 53 - Preenchimento para determinação do volume remanescente da placa atingida.	111
Figura 54 - Corpo de prova GP1 após ensaio balístico.	113
Figura 55 - Corpo de prova GP1 após ensaio balístico: (a) Detalhe do descolamento das placas adjacentes; (b) detalhe do painel evidenciando um preenchimento uniforme nas placas mais distantes à atingida (c) painel após retirada da placas descoladas.	114
Figura 56 - Corpo de prova GP2 após ensaio balístico: (a e b) Detalhe do defeito na interface preenchimento/alumina após ensaio; (c) Visualização do dano geral no painel.....	115
Figura 57 - Corpo de prova GP3 após ensaio balístico: (a) Placa atingida; (b) Dano na placa adjacente (c) Visão geral do painel.....	116
Figura 58 - Dados obtidos com os <i>strain-gages</i> : corpo de prova GP2.....	116
Figura 59 - Danos nas placas centrais atingidas nos painéis. Primeira linha: SP1, SP2 e SP3; segunda linha: EP1, EP2 e EP3; e terceira linha: GP1, GP2 e GP3.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da alumina de acordo com o fornecedor.	57
Tabela 2 - Composição química da liga de alumínio 6063.	58
Tabela 3 - Propriedades da resina epóxi utilizada.	59
Tabela 4 - Materiais de preenchimento estudados para aplicação no painel balístico.	60
Tabela 5 - Análise química da alumina em pó (carga).	60
Tabela 6 - Distribuição de tamanho de partículas.	61
Tabela 7 - Distribuição de tamanho de partículas do quartzo.	62
Tabela 8 - Componentes de projétil calibre .30 AP M2 (7,62 mm)	73
Tabela 9 - Identificação dos corpos de prova submetidos ao teste balístico.	74
Tabela 10 - Densidade aparente, real e porosidade total das placas de alumina.	77
Tabela 11 - Módulo de Young, coeficiente de Poisson, velocidade sônica e impedância mecânica.	78
Tabela 12 - Módulo de Young, coeficiente de Poisson, velocidade sônica e impedância para as placas de mosaico e monolítica.	79
Tabela 13 - Módulo de resistência à flexão e tenacidade à fratura.	80
Tabela 14 - Dureza por microindentação Vickers e Knoop da alumina comercial estudada e aluminas balísticas.	81
Tabela 15 - Fragilidade e capacidade de dissipação de energia.	83
Tabela 16 - Tamanho de grão das amostras analisadas.	86
Tabela 17 - Materiais estudados para serem empregados como material de preenchimento.	87
Tabela 18 - Propriedades dos materiais de preenchimento escolhidos e respectivas intensidades de onda refletida para a cerâmica.	90
Tabela 19 - Dureza, Velocidade de Impacto e profundidade de penetração dos tarugos de referência.	93
Tabela 20 - Dados do ensaio balístico dos painéis monolíticos.	95
Tabela 21 - Dados do ensaio balístico dos corpos de prova SP.	102
Tabela 22 - Dados do ensaio balístico dos corpos de prova EP.	112
Tabela 23 - Dados do ensaio balístico dos corpos de prova GP.	112
Tabela 24- Danos nos corpos de prova após ensaio balístico.	117

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	29
2 OBJETIVOS.....	33
2.1 OBJETIVO GERAL	33
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
3.1 HISTÓRICO	35
3.2 BLINDAGENS HÍBRIDAS	35
3.2.1 Placa cerâmica.....	37
3.2.2 Placa de apoio	39
3.2.3 Camada adesiva	40
3.3 MECANISMO DE IMPACTO BALÍSTICO	41
3.3.1 Fratura da cerâmica	41
3.3.2 Penetração do projétil.....	47
3.4 CONFIGURAÇÃO EM MOSAICO	51
4 METODOLOGIA	55
4.1 MATERIAIS.....	56
4.1.1 Placas cerâmicas.....	56
4.1.2 Placas de apoio	58
4.1.3 Adesivo	59
4.1.4 Materiais de preenchimento.....	59
4.1.4.1 Epóxi.....	60
4.1.4.2 Argamassa de cimento Portland CP V	61
4.1.4.3 Materiais odontológicos.....	61
4.1.4.4 Geopolímero	62
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO PAINEL	63
4.2.1 Placas de alumina.....	63
4.2.1.1 Densidade aparente, densidade real e porosidade total	63
4.2.1.2 Módulo de Young, coeficiente de Poisson e impedância.....	63
4.2.1.3 Módulo de resistência à flexão.....	64
4.2.1.4 Tenacidade à fratura.....	65
4.2.1.5 Dureza por microindentação Vickers e Knoop	66
4.2.1.6 Fragilidade e capacidade de dissipação de energia balística.....	66
4.2.1.7 Análise microestrutural	67
4.2.2 Materiais de preenchimento.....	67
4.3 MONTAGEM DOS PAINÉIS BALÍSTICOS	68
4.3.1 Preparação dos tarugos de alumínio	68
4.3.2 Montagem dos painéis monolíticos	68
4.3.3 Montagem dos painéis em mosaico.....	69
4.3.2.1 Aplicação do material de preenchimento tipo I	70

4.3.2.2 Aplicação do material de preenchimento tipo II	70
4.4 ENSAIO BALÍSTICO DE PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO	71
4.4.1 Medida da onda de tensão	75
4.4.2 Câmera de alta velocidade	76
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ALUMINA	77
5.1.1 Densidade aparente, densidade real e porosidade total	77
5.1.2 Módulo de Young, coeficiente de Poisson e impedância	78
5.1.3 Módulo de Resistência à Flexão e Tenacidade à Fratura	80
5.1.4 Dureza por Microindentação Vickers e Knoop	81
5.1.5 Fragilidade e Capacidade de Dissipação de Energia	83
5.1.6 Análise Microestrutural	84
5.2 ESCOLHA DO MATERIAL DE PREENCHIMENTO	87
5.2.1 Resina epóxi	88
5.2.2 Materiais odontológicos	88
5.2.3 Argamassas de cimento Portland V	89
5.2.4 Geopolímero	89
5.2.5 Materiais selecionados	90
5.3 ENSAIO BALÍSTICO	90
5.3.1 Blocos de Referência (Tarugos de Alumínio)	90
5.3.2 Painéis monolíticos	94
5.3.3 Painéis em mosaico sem material de preenchimento	101
5.3.4 Painéis em mosaico com material de preenchimento tipo I	106
5.3.5 Painéis em mosaico com material de preenchimento tipo II	112
5.3.6 Comparação entre as condições	117
6 CONCLUSÃO	121
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
REFERÊNCIAS	125

1 INTRODUÇÃO

O contínuo aprimoramento das armas de fogo demanda consequente aperfeiçoamento de dispositivos de proteção balística. Buscam-se armaduras mais resistentes e de menor peso para uso pessoal, veicular e aplicações estruturais (GRUJICIC; PANDURANGAN; D'ENTREMONT, 2012; MEDVEDOVSKI, 2010a; REIJER, 1991). Placas metálicas são excessivamente pesadas. Placas poliméricas simples possuem baixo desempenho de proteções. As cerâmicas por sua vez são componentes de grande importância em blindagens contra armas de maior poder destrutivo (WANG; LU, 1996; WILKINS, 1978). As propriedades que mais se destacam são: menor densidade, maior dureza, módulo de Young e resistência mecânica à compressão (KRELL; STRASSBURGER, 2007, 2014; ROZENBERG; YESHURUN, 1988; WANG; CHEN; CHEN, 2013; WILKINS, 1978).

Diferentes materiais cerâmicos são empregados em proteções balísticas. Cerâmicas oxidadas como aquelas aluminosas com diferentes teores de Al_2O_3 ; e não oxidadas, na maioria carbetos, nitretos, boretos e suas combinações (ANDERSON JR.; ROYAL-TIMMONS, 1997; MADHU et al., 2005; MEDVEDOVSKI, 2010a; VYSHNYAKOV et al., 2004; ZHITNYUK; MAKAROV; GUSEVA, 2014). A alumina é a matriz mais amplamente empregada. Apresenta baixo custo, pode ser manufaturada a partir de diversos processos e exibe bom nível de resposta a impactos balísticos (MEDVEDOVSKI, 2010a; WANG; CHEN; CHEN, 2013). O comportamento frágil das cerâmicas torna necessário o emprego de placas dúcteis na face posterior ao do impacto, podendo ser metálicas ou poliméricas (CHOCRON BENLOULO; SÁNCHEZ-GÁLVEZ, 1998; WOODWARD, 1990; ZAERA; NAVARRO, 2000). Essas são responsáveis por parte da transmissão das ondas de choque, auxiliando na dissipação da energia de impacto e evitando a flexão da placa (TAN, 2014; WILKINS, 1978; WOODWARD et al., 1994).

Quando o projétil atinge a blindagem este é fragmentado pela cerâmica dura. Ondas de choque são geradas na placa cerâmica (ESPINOSA et al., 1998; FELI; ASGARI, 2011; GOEL et al., 2014; SASTRY et al., 2014). Ondas de tensão compressivas e de cisalhamento são propagadas na direção da espessura. Na direção do plano ortogonal ao projétil são propagadas ondas trativas e também de cisalhamento. Ao atingirem as extremidades da placa, em ambas as direções, as ondas são refletidas (GHOMI, 2011; MEYERS, 1994). A interação entre essas

ondas de tensão elevam o estresse a que o material é submetido, até que ocorra a fratura do corpo, fragmentando-o (WILKINS, 1978).

A presença de interfaces no material provoca a transmissão e reflexão das ondas de tensão incidentes, de acordo com a diferença de impedância entre os meios, levando a sua atenuação (GHOMI, 2011; LOPEZ-PUENTE et al., 2005; NAIK; GOEL; KULKARNI, 2008). A atenuação destas ondas de choque pode ser de caráter microestrutural, devido às interfaces entre grãos e matriz cerâmica, ou a nível macroscópico, promovida pelas interfaces às extremidades da placa (GOEL et al., 2014). A utilização de placas de apoio é devido ao mecanismo de atenuação por macrointerface. A existência de inúmeras micro e/ou macrointerfaces leva a múltiplas reflexões e transmissões de onda, que são responsáveis pela dissipação da energia de impacto (NAIK; GOEL; KULKARNI, 2008).

Quando as dimensões da placa são muito maiores que a do projétil que a atinge, há uma maior extensão para a propagação das ondas de tensão na direção do plano e também maiores restrições laterais (GRUJICIC; PANDURANGAN; D'ENTREMONT, 2012). Observa-se neste caso um bom desempenho quando a proteção é atingida por um primeiro projétil (MEDVEDOVSKI, 2010b). Ao serem atingidas por um segundo disparo, por já se apresentarem fraturadas, seu desempenho pode ser reduzido significativamente (GRUJICIC; PANDURANGAN; D'ENTREMONT, 2012; ZAERA; NAVARRO, 2000). Contra projéteis penetrantes, blindagens monolíticas praticamente não suportam múltiplos tiros (MEDVEDOVSKI, 2010b).

O emprego de mosaicos promove a redução da extensão do dano ao longo da blindagem (HAZELL; ROBERSON; MOUTINHO, 2008; MEDVEDOVSKI, 2010b). Quando o painel é atingido, a fratura não compromete o desempenho de toda a proteção, mas somente da peça atingida e/ou de algumas adjacentes (GRUJICIC; PANDURANGAN; D'ENTREMONT, 2012). Porém, mesmo em mosaicos de alta qualidade, o encaixe das placas não é perfeito, deixando as interfaces vulneráveis (HAZELL; ROBERSON; MOUTINHO, 2008). Impactos nas interfaces são bastante prováveis para as diferentes geometrias usuais (triangular, quadrada e hexagonal). Estatisticamente, a geometria hexagonal apresenta uma vulnerabilidade de interfaces ligeiramente menor que as outras geometrias (BLESS; JURICK, 1998). Poucos trabalhos publicados estudam o desempenho desta configuração. Testes balísticos com esta configuração tem ainda mostrado que a expansão dos fragmentos da placa atingida pode levar à fratura das placas

adjacentes (ÜBEYLI; YILDIRIM; ÖGEL, 2008; ZAERA; NAVARRO, 2000). Além disso, a placa com as dimensões reduzidas necessita absorver a mesma energia de impacto que a monolítica, sendo submetida a uma solicitação mecânica mais intensa (HAZELL; ROBERSON; MOUTINHO, 2008). Isso requer que o desempenho balístico do material seja maior do que no caso de uma placa monolítica. O melhoramento do desempenho da blindagem pode implicar na necessidade de incorporação de outros materiais na sua composição, ou pode ocorrer a partir de mudanças na configuração do painel balístico.

O confinamento de cerâmicas monolíticas submetidas a impacto balístico foi estudado por diversos autores (ANDERSON JR.; ROYAL-TIMMONS, 1997; CHI et al., 2015; ESPINOSA et al., 2000; LYNCH et al., 2006; SHERMAN; BEN-SHUSHAN, 1998; SHERMAN, 2000; SHOCKEY et al., 1990; TAN et al., 2010). Nesses estudos os alvos cerâmicos foram confinados a partir de molduras de aço, cuja impedância de choque é semelhante ao da cerâmica, reduzindo o efeito de reflexão de ondas (SHERMAN; BEN-SHUSHAN, 1998). As placas exibiram uma dinâmica de fragmentação que aumentou a energia absorvida pela blindagem e reduziu a profundidade de penetração na placa de apoio quando comparados a alvos sem nenhum tipo de confinamento (ANDERSON JR.; ROYAL-TIMMONS, 1997; LYNCH et al., 2006; WESTERLING; LUNDBERG, 1995). O comportamento pode variar com o tipo de placa de apoio e velocidade de impacto (SHERMAN; BEN-SHUSHAN, 1998; SHERMAN, 2000).

A inserção de um material de preenchimento nos espaçamentos entre as placas constituintes do mosaico poderia atuar de modo a reduzir a vulnerabilidade da cerâmica. Aplicando equações de propagação de ondas em sólidos Goel et al. (2014) simularam a atenuação das mesmas ao longo do plano do painel, na presença do preenchimento. A existência de uma camada com diferença de impedância em relação à cerâmica leva à transmissão de parte da onda, atenuando a intensidade refletida para a placa. O preenchimento pode também ter um efeito de confinamento, evitando que a placa fraturada expanda e fracture as adjacentes. Nenhum estudo do desempenho balístico desta configuração foi encontrado em literatura aberta.

Este trabalho propôs-se a avaliar o desempenho de painéis balísticos em mosaico construído com placas de alumina em formato hexagonal obtidas de um fornecedor brasileiro. Diferentes condições de preenchimento foram avaliadas: (1) sem o emprego de material de preenchimento; (2) utilizando material de preenchimento tipo I; (3)

utilizando material de preenchimento tipo II. A diferença entre os materiais de preenchimentos foi a impedância dos mesmos. Essa altera a intensidade da onda refletida para a placa. Os resultados foram comparados com blindagens monolíticas de placas de alumina do mesmo fornecedor. O trabalho está incluído na linha de pesquisa “Desenvolvimento e processamento de materiais” do Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais é parte de um projeto CAPES Pró-Defesa, intitulado “Desenvolvimento de materiais funcionais para blindagem balística”. A finalidade é implantar redes de cooperação acadêmica no país na área de Defesa Nacional.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o efeito da utilização de material de preenchimento e suas propriedades no desempenho de painéis balísticos híbridos alumina/alumínio em forma de mosaico em comparação à proteção monolítica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral da proposta, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar as placas de alumina obtidas de um fornecedor nacional para compará-las com aluminas balísticas;
- Escolher dois materiais de preenchimento com base na impedância e facilidade de aplicação;
- Avaliar o desempenho balístico dos painéis (1) monolíticos; (2) em forma de mosaico sem preenchimento, (3) com preenchimento tipo I e (4) com preenchimento tipo II.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO

A evolução das blindagens ao longo da história vem de encontro com o aperfeiçoamento dos armamentos nas batalhas. As primeiras armaduras eram de couro, para proteger contra animais e condições do tempo (REIJER, 1991). A partir da utilização de punhais, espadas e flechas, tornou-se necessária a utilização de metais, como bronze e aço, juntamente com o couro. Após o surgimento das armas de fogo, novos sistemas de blindagens precisaram ser desenvolvidos (TAPLIN *apud* MOTA, 2010; REIJER, 1991).

Durante a Primeira Guerra Mundial, os carros em combate eram blindados com placas de aço de aproximadamente 12 mm de espessura, que também apresentavam função estrutural. O mesmo tipo de blindagem era utilizado durante a Segunda Guerra Mundial, porém, a espessura da placa era em torno de 280 mm, devido ao maior poder de fogo dos armamentos (MOTA, 2010). O aperfeiçoamento das munições e armas levou ao desenvolvimento de novos materiais e configurações para a obtenção de blindagens de alto desempenho. A utilização de diferentes tipos de materiais em conjunto, formando uma blindagem híbrida (ou composta), tornou-se necessária (WILKINS, 1978).

3.2 BLINDAGENS HÍBRIDAS

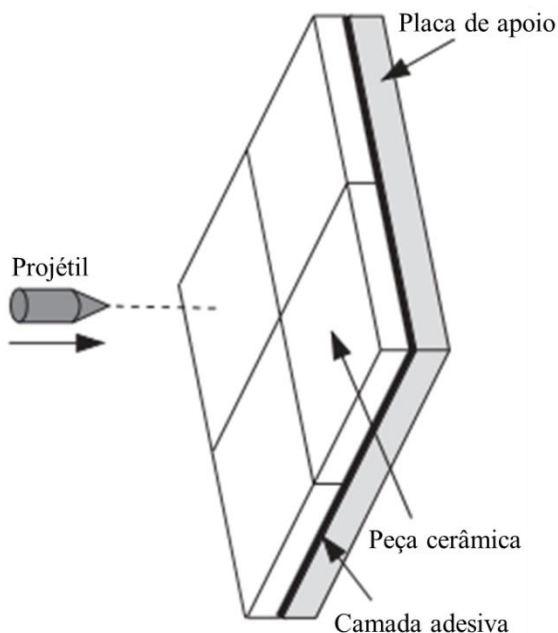
Proteções balísticas metálicas absorvem a energia de impacto a partir da deformação plástica (WILKINS, 1978). A blindagem contra projéteis de alta energia cinética a partir destes materiais demanda painéis de elevada espessura para absorver a energia, resultando em proteções de alta densidade superficial (kg/m^2) (REIJER, 1991; WANG; CHEN; CHEN, 2013).

Materiais cerâmicos são aplicados em sistemas de blindagens há décadas, devido a sua baixa densidade, alta dureza e resistência à compressão (MEDVEDOVSKI, 2010a). O intuito de sua aplicação é desacelerar o projétil e dissipar a energia de impacto. Ao colidir com a placa cerâmica, o projétil tem sua ponta destruída, o que reduz sua massa e energia, aumentando a eficiência da blindagem. A fragilidade e baixa resistência à tração da cerâmica limitam a sua capacidade de absorção de energia (KAUFMANN et al., 2003).

De acordo com Den Reijer (1991), uma única placa de alumina de 11,4 mm de espessura, para determinado projétil, apresenta uma velocidade limite de impacto de 390 m/s. Para a mesma densidade superficial, a velocidade balística limite para uma blindagem híbrida alumina/alumínio, ambas com 6,35 mm de espessura, é de 650 m/s, evidenciando o melhor desempenho do sistema híbrido (REIJER, 1991; ZAERA; NAVARRO, 2000).

A utilização de placas de apoio de material dúctil, posicionadas na face posterior da cerâmica, aumentam significativamente o desempenho da blindagem (WILKINS, 1978; WOODWARD, 1990; ZAERA; NAVARRO, 2000). Com esta configuração (Figura 1) o início da falha por tração na cerâmica é retardado, aumentando a erosão do projétil (LEE; YOO, 2001). Os fragmentos cerâmicos são confinados e a placa de apoio absorve parte da energia cinética do projétil durante a penetração (CHOCRON BENLOULO; SÁNCHEZ-GÁLVEZ, 1998; ZAERA; NAVARRO, 2000). Uma explanação mais aprofundada é dada no item 3.3 deste trabalho.

Figura 1 - Blindagem híbrida.



Fonte: Adaptado de LÓPEZ-PUENTE et al., 2005.

Alguns autores estudaram o emprego de mais de uma camada de cerâmica em blindagens (laminadas ou “sanduíches”), considerando que ao serem atingidas, apenas a primeira camada fraturaria, e as próximas se manteriam intactas. Experimentos utilizando blindagens de duas camadas de cerâmica substituindo uma camada de mesma espessura mostraram que essa configuração diminui a eficiência da blindagem (MEDVEDOVSKI, 2010b; ÜBEYLI; YILDIRIM; ÖGEL, 2008; WILKINS, 1978). O comportamento é justificado pela fratura prematura da cerâmica, já que as ondas são refletidas ao atingir a extremidade da primeira placa. Desta forma o projétil segue sem sofrer dano significativo, fraturando as outras placas. O emprego de cerâmicas em multicamadas melhora a eficiência somente quando diferentes materiais são postos em camadas e prensados a quente para obter um corpo monolítico (MEDVEDOVSKI, 2010b). Desta forma, blindagens com apenas uma camada cerâmica são as mais comumente empregadas.

3.2.1 Placa cerâmica

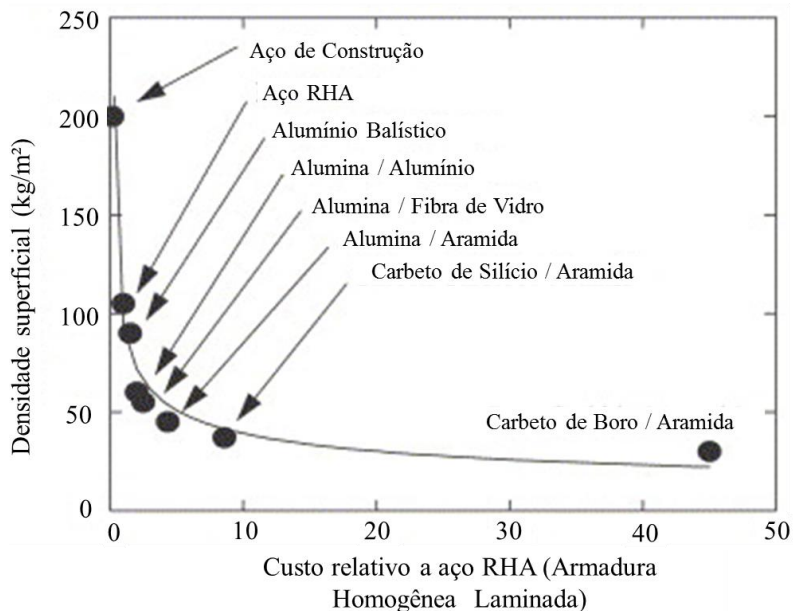
Cerâmicas e seus compósitos são atrativos para uso em sistemas de blindagens devido a sua menor densidade, maior dureza, módulo de Young e resistência mecânica à compressão quando comparados com outras classes de materiais (KRELL; STRASSBURGER, 2007, 2014; ROZENBERG; YESHURUN, 1988; WANG; CHEN; CHEN, 2013; WILKINS, 1978). Diferentes cerâmicas são utilizadas como placa frontal da blindagem. Dentre elas estão a alumina (Al_2O_3), Alumina-Mulita ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}3\text{SiO}_2\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$), carbeto de boro (B_4C), carbeto de silício (SiC), nitreto de silício (Si_3N_4), nitreto de alumínio (AlN) e outros (MADHU et al., 2005; MEDVEDOVSKI, 2010b).

Na Figura 2 o custo de diferentes blindagens capazes de obstruir um projétil de 7,62 mm AP (com diferentes densidades superficiais) é comparado com o do aço para blindagem convencional (RHA, em inglês “*Rolled Homogeneous Armour*”).

Apesar da elevada densidade ($3,95 \text{ g/cm}^3$) comparada a outras cerâmicas ($2,5\text{-}3,3 \text{ g/cm}^3$), blindagens híbridas de alumina (com diferentes materiais atuando como placa de apoio) apresentam um custo relativo baixo e metade da densidade do aço convencional (MEDVEDOVSKI, 2010a). Proteções que empregam carbetos, nitretos ou boretos têm uma redução de peso que pode ser superior a 65% comparada a blindagens metálicas. O alto custo destes materiais e maior dificuldade de processamento, entretanto, justifica o emprego de

alumina como cerâmica, exceto em aplicações para blindagem pessoal, onde o peso é fator de maior relevância (LOPEZ-PUENTE et al., 2005; MEDVEDOVSKI, 2010a).

Figura 2 - Densidade superficial necessária para blindagem contra projétil 7,62 mm AP com velocidade de 800 m/s vs. custo relativo da blindagem.



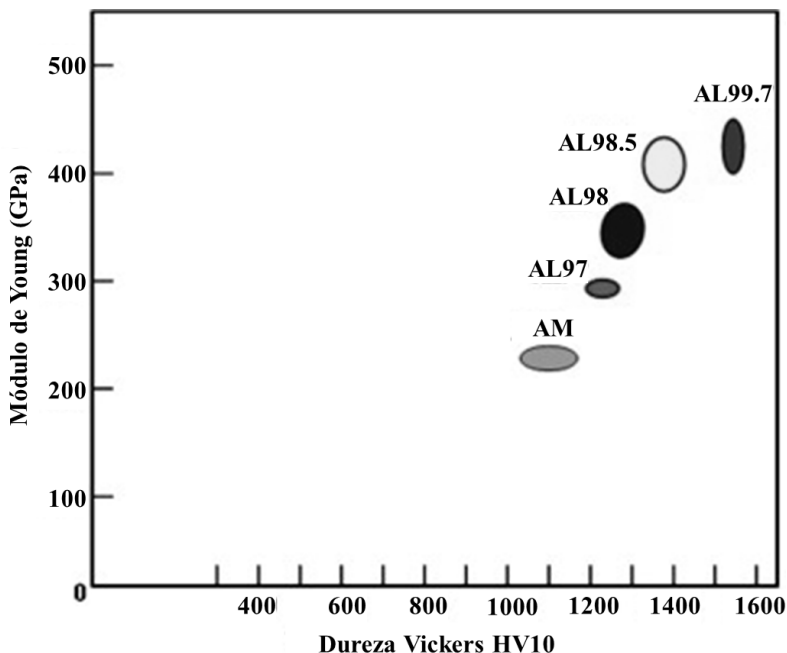
Fonte: Adaptado de LÓPEZ-PUENTE et al., 2005.

Krell e Strassburger (2007) estudaram a influência de algumas variáveis sobre a eficiência da cerâmica. Eles observaram que a profundidade de penetração não apresenta relação com a quantidade de impurezas, porosidade residual ou tamanho de grão. A eficiência na obstrução de um projétil perfurante no momento do impacto e penetração inicial requer alta rigidez e dureza das placas cerâmicas como principais características (KRELL; STRASSBURGER, 2007). Estas propriedades variam significativamente com diferentes percentuais de Al_2O_3 (WANG; CHEN; CHEN, 2013).

Na Figura 3 são apresentados o módulo de Young e a dureza por microindentação Vickers para diferentes teores de Al_2O_3 . Estas propriedades mecânicas consideradas para cinco diferentes tipos de

alumina apontam as purezas de 98,5 e 99,7% como as mais adequadas para a utilização em armaduras.

Figura 3 - Módulo de Young vs. dureza por microindentação Vickers para composições com diferentes percentuais de Al_2O_3 (AM: alumina-mulita).



Fonte: Adaptado de WANG et al., 2013.

3.2.2 Placa de apoio

O material que constitui a placa de apoio pode ser metálico, ou composto por fibras de alta resistência à tração, Kevlar™, Twaron™, Spectra™, Dyneema™. Polímeros com fibras reforçadas podem apresentar maior eficiência, principalmente para blindagem pessoal, e desta forma são amplamente empregados (MEDVEDOVSKI, 2010a; MOTA, 2010). Placas metálicas, no entanto, apresentam a vantagem de terem menor custo e apresentarem um papel estrutural além de blindagem (LOPEZ-PUENTE et al., 2005).

Sherman (2000) estudou três diferentes placas de apoio de mesma espessura: aço 4310, alumínio 7075 T6 e o compósito polimérico Spectra™, contra projéteis perfurantes NATO 0.3cal. O aço possui impedância próxima a da cerâmica e alta capacidade de dissipação de energia. Desta forma ele é capaz de reduzir a deformação no impacto, dissipar energia cinética e minimizar a reflexão de ondas de tensão para a cerâmica. Alumínio e alumina possuem um descasamento de impedância moderado, e o alumínio possui rigidez mediana, enquanto que o compósito Spectra™ reflete grande parte das ondas de tensão, devido à sua baixa impedância e pode sofrer grande deformação devido sua baixa rigidez, mas possui boa habilidade de dissipação de energia (SHERMAN, 2000).

Por apresentar menor densidade em relação ao aço e ser facilmente obtido, o alumínio é amplamente empregado em armaduras. Estudos que visam avaliar o desempenho das cerâmicas em blindagens, comumente empregam o alumínio (KRELL; STRASSBURGER, 2014). A realização de tratamento de solubilização e envelhecimento nas ligas de alumínio melhora as propriedades mecânicas, o que contribuiu significativamente para melhorar o desempenho balístico (ÜBEYLI et al., 2008).

3.2.3 Camada adesiva

A união das placas que constituem a blindagem é realizada por adesivos poliméricos. Poucos trabalhos tem explorado a influência da camada adesiva no desempenho balístico. Convencionalmente, para armaduras destinadas a veículos, os adesivos elastoméricos são preferíveis em relação a adesivos rígidos (como o epóxi) por não apresentarem a tendência de transferência das cargas que são geradas na movimentação do automóvel (GRUJICIC; PANDURANGAN; D'ENTREMONT, 2012). Para fins estruturais, adesivos rígidos são amplamente empregados, o epóxi é o adesivo mais comum para este fim.

Blindagens híbridas utilizando epóxi como adesivo foram estudadas por diversos autores. Em comparação a outros adesivos, o epóxi apresentou maior descolamento de fragmentos, porém, em geral, melhor desempenho balístico, pois é capaz de transmitir maior intensidade das ondas de choque para a placa de apoio (HAZELL; ROBERSON; MOUTINHO, 2008; MADHU et al., 2005; PRAKASH et

al., 2013; ÜBEYLI; YILDIRIM; ÖGEL, 2008; ZAERA; NAVARRO, 2000).

3.3 MECANISMO DE IMPACTO BALÍSTICO

A divisão dos estágios do impacto balístico difere entre autores (CHOCRON BENLOULO; SÁNCHEZ-GÁLVEZ, 1998; GONÇALVES et al., 2004; MOTA, 2010). De modo geral, o fenômeno de fratura de uma proteção balística híbrida quando exposto a um impacto, pode ser dividido em fratura da cerâmica e penetração do projétil (BENLOULO; SANCHEZ-GALVEZ, 1998). Inicialmente a placa cerâmica recebe o impacto do projétil e o cone de fraturas é formado. Em seguida tem-se a penetração do projétil na blindagem e deformação da placa de apoio. Uma descrição mais detalhada de cada estágio é apresentada a seguir.

3.3.1 Fratura da cerâmica

Este estágio é compreendido entre o impacto do projétil na placa até a formação do cone de fraturas, aonde inicia-se a perfuração. A força exercida pelo projétil ao impactar a placa cria diferentes ondas de tensão que se propagam no material (CHOCRON BENLOULO; SÁNCHEZ-GÁLVEZ, 1998; FELI; ASGARI, 2011; MEYERS, 1994; SHERMAN; BEN-SHUSHAN, 1998; TATE, 1967). Na Figura 4 estas ondas são ilustradas.

As ondas geradas se propagam ao longo da espessura na forma de ondas longitudinais de compressão e ondas de cisalhamento e, na direção do plano, como ondas longitudinais de tração e de cisalhamento (GOEL et al., 2014; NAIK; GOEL; KULKARNI, 2008). Ambas as frentes de onda (longitudinais e de cisalhamento) são esféricas. Ondas superficiais também podem ser geradas em materiais não isotrópicos (GHOMI, 2011; MEYERS, 1994).

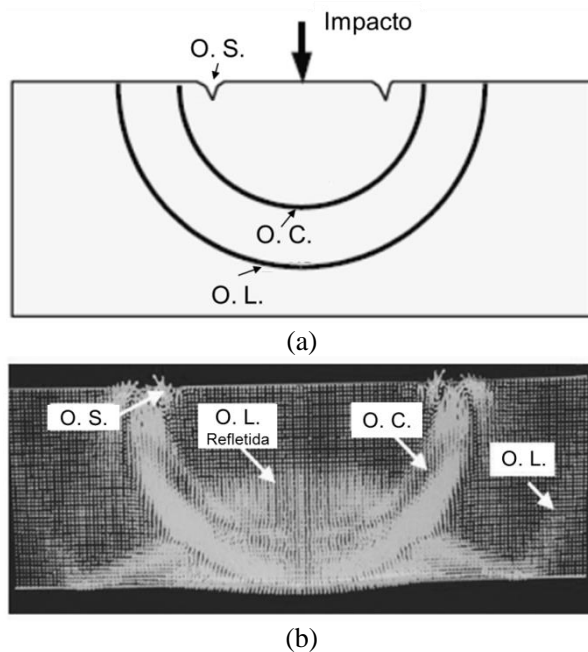
A velocidade de propagação uniaxial das ondas longitudinais em um meio infinito é dada pela equação 1 (MEYERS, 1994).

$$C = \sqrt{\frac{(1 - \nu) E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu) \rho}} \quad Eq. (1)$$

Onde C é a velocidade de propagação da onda (m/s), ν é o coeficiente de Poisson, E é o módulo de Young (Pa) e ρ é a densidade do meio (kg/m^3).

Figura 4 - Ondas de estresse causadas por impacto em um corpo sólido (a) representação esquemática e (b) simulação de elementos finitos.

O.C: Ondas de cisalhamento; O.L.: ondas longitudinais; O.S.: ondas superficiais.



Fonte: Adaptado de Ghomi, 2011.

As propriedades de densidade e velocidade de propagação da onda podem ser relacionadas para a determinação da impedância do material através da equação 2.

$$Z = \rho \cdot C \quad \text{Eq. (2)}$$

Ao atingirem interfaces através das quais há um descasamento de impedância, as ondas de tensão sofrem reflexão e transmissão. Ou seja, em cada interface, parte da onda é transmitida e parte refletida de volta para o meio.

As intensidades das ondas refletida e transmitida são calculadas a partir das equações 3 e 4 respectivamente.

$$\sigma_R = \frac{(\rho_B C_B - \rho_A C_A) \sigma_I}{\rho_B C_B + \rho_A C_A} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\sigma_T = \frac{2\rho_B C_B \sigma_I}{\rho_B C_B + \rho_A C_A} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde σ_I , σ_R e σ_T representam as intensidades da onda incidente, refletida e transmitida, respectivamente, ρ_A a densidade do meio A, ρ_B a densidade do meio B, e C a velocidade da onda nos meios, calculada pela equação 1. Para uma superfície livre $\sigma_R = -\sigma_I$ e $\sigma_T = 0$.

As equações 3 e 4 também podem ser escritas conforme as equações 5 e 6.

$$\sigma_R = \frac{(Z_B - Z_A) \sigma_I}{(Z_B + Z_A)} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\sigma_T = \frac{2Z_B \sigma_I}{Z_B + Z_A} \quad \text{Eq. (6)}$$

Quando a impedância de A é maior que a de B, a intensidade refletida é negativa, ou seja, se a onda incidente é trativa, a onda refletida será compressiva (CARINO, 2004). Ainda, quanto maior a diferença de impedância entre os meios, maior será a intensidade da onda refletida de volta para meio A (para $Z_A \gg Z_B$).

Desta forma, as ondas de tensão são atenuadas ao atingirem as interfaces presentes no material, aonde sofrem espalhamento por consecutivas transmissões e reflexões (GOEL et al., 2014). A atenuação pode ser de dois tipos: microatenuação (internamente no material) e macroatenuação (extremidades das placas).

Na microatenuação, as diferenças de impedância entre as diversas fases presentes na microestrutura (grão, contorno de grão, fases secundárias, poros, etc.) são responsáveis pelas transmissões e reflexões nas suas respectivas interfaces (NAIK; GOEL; KULKARNI, 2008).

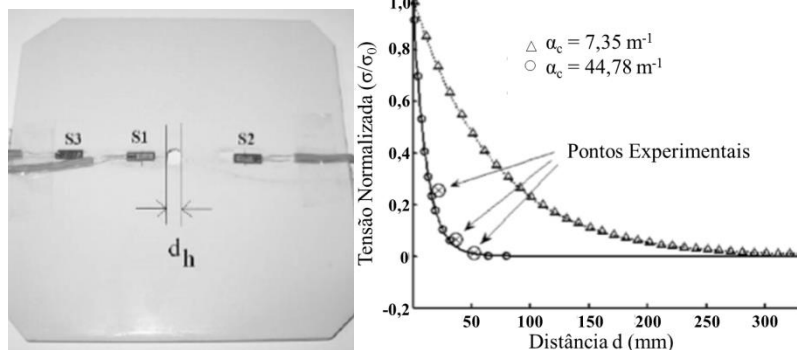
Roth (1948) observou que o tamanho de grão influi de maneira indiretamente proporcional na atenuação. Evans et al. (1978)

relacionaram a atenuação ultrassônica com a microestrutura dos materiais, e sugeriram que esta é diretamente proporcional à densidade e inversamente proporcional ao módulo de elasticidade do meio. Naik et al. (2008) criaram um modelo geométrico para determinar o coeficiente de atenuação de ondas planares num material cerâmico a partir dessas observações (EVANS et al., 1978; ROTH; 2006). Para a simulação, consideraram grãos cúbicos e suas interfaces com contornos de grão. O coeficiente de atenuação pode ser calculado conforme equação 7.

$$\alpha_c = \frac{-\ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)}{2d} \quad Eq. (7)$$

Onde α_c é o coeficiente de atenuação (m^{-1}), σ a tensão na distância d , σ_0 a tensão incidente e d a distância a partir do ponto de impacto. Os resultados apontaram que para maiores diferenças de impedância entre grão e contorno de grão, maior a atenuação da onda de choque. Além disso, menores tamanhos de grão levaram a maior atenuação devido ao maior número de interfaces.

Figura 5 - Placa utilizada para determinação do coeficiente de atenuação após o impacto (S1, S2 e S3 são os strain-gages colados a 15, 30 e 45 mm do ponto de impacto) e (b) resultados da simulação com diferentes coeficientes de atenuação (pontos experimentais indicados no gráfico).



Fonte: Naik et al., 2008.

O modelo foi validado a partir da instalação de *strain-gages* instalados na placa cerâmica submetida ao impacto (Figura 5a). A similaridade entre os resultados experimentais e as simulações

evidenciou que o método pode prever de maneira satisfatória o coeficiente de atenuação, apenas considerando a teoria de onda unidimensional (Figura 5b).

A macroatenuação ocorre em nível estrutural, nas extremidades das placas. Quando a placa cerâmica não está aderida a nenhuma outra, a onda que já sofreu microatenuação é totalmente refletida para o interior da placa ao atingir a borda. As ondas refletidas como ondas de tração, interagem com as ondas de compressão em propagação, submetendo o material a níveis muito altos de esforços trativos (WILKINS, 1978). Associado a isso, está a flexão livre da placa cerâmica, por não estar aderida a nenhuma superfície. A interação resultante ocasiona o dano prematuro à placa cerâmica.

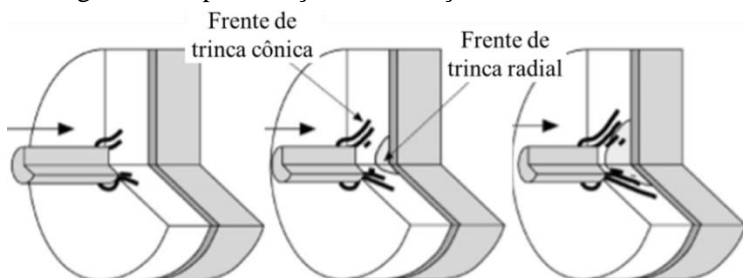
Placas dúcteis aderidas à face posterior são responsáveis por reduzir esses esforços. Primeiramente, elas confinam a cerâmica, diminuindo a flexão da placa. A segunda vantagem é que parte da onda de choque é transmitida para a placa de apoio, reduzindo a magnitude refletida para a cerâmica (σ_R e σ_T podem ser calculadas pelas equações 3 e 4, respectivamente). Ambos os mecanismos retardam a fratura (WILKINS, 1978; BENLOULO & SÁNCHEZ-GÁLVEZ, 1998; LEE & YOO, 2001).

A onda de choque proveniente da cerâmica é parcialmente transmitida para o adesivo e depois para a placa de apoio. Zaera et al. (2000) estudaram blindagens Al_2O_3/Al com dois adesivos: poliuretano, que possui baixo módulo de elasticidade e, epóxi, que apresenta maior módulo, e portanto, impedância acústica mais próxima à cerâmica. Concluíram que grandes diferenças de impedâncias entre cerâmica e adesivo levam a maiores esforços trativos na cerâmica, pois maior a fração da onda que é refletida. A fratura prematura do material, causada neste caso, tem menor efeito erosivo no projétil, e menor capacidade de absorção de energia da blindagem.

A espessura da camada também tem grande influência no desempenho. López Puente et al. (2005) avaliaram que maiores espessuras induzem a deformação sobre uma maior área da placa de apoio, o que significa maior absorção de energia cinética do projétil. Em contrapartida, a carga deve ser transmitida do adesivo para a placa metálica o mais rápido possível, já que a impedância do metal é muito maior e poderá absorver maior energia antes da fragmentação. As espessuras das camadas de adesivo variaram de 0,1 a 1,1 mm. A espessura de 0,3 mm foi considerada a melhor para a configuração estudada.

Da interação entre as ondas compressivas e trativas provenientes das diferentes interfaces internas e externas da blindagem resulta o alívio dos esforços a partir da formação de trincas (separação física das partículas), cujas direções axial e radial dão origem ao chamado cone de fraturas, ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Representação da formação do cone de fraturas.



Fonte: Adaptado de LÓPEZ-PUENTE et al., 2005.

Na Figura 7 é apresentada uma imagem de uma blindagem submetida ao impacto. O cone de fraturas pode ser visto ao centro.

Figura 7 - Cone de fraturas em blindagem híbrida cerâmica-metal submetida a ensaio balístico.



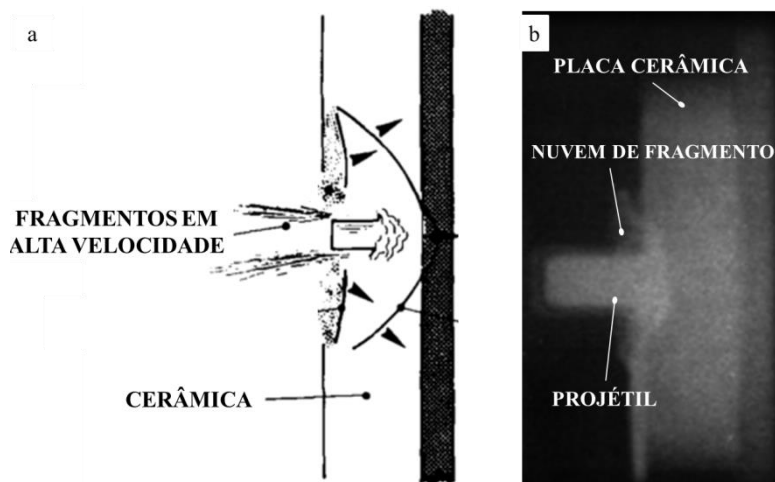
Fonte: GONÇALVES, 2000.

O ângulo do cone depende das propriedades elásticas do projétil e placa, apresentando valor próximo a 65° (GONÇALVES, 2000). O projétil tem sua ponta destruída e considera-se que a velocidade de penetração neste estágio é nula.

3.3.2 Penetração do projétil

Este estágio inicia com a penetração do projétil na cerâmica. O cone de fraturas começa a se mover: de um lado ele é empurrado pelo projétil, e de outro, é mantido aprisionado pela placa de apoio (BERNOULO e SÁNCHEZ-GALVEZ, 1998). O fenômeno de penetração depende das características microestruturais da cerâmica e da configuração da blindagem (GONÇALVES, 2000). O formato e o tamanho de grão da placa frontal auxiliam tanto como ferramenta de corte como aumentando a resistência mecânica. A blindagem contribui para a redução da velocidade do projétil erodindo-o com os fragmentos gerados no cone de fraturas, que ocorre enquanto a velocidade do projétil (V_p) é maior que a velocidade da interface projétil-cerâmica (V_i). Durante esta fase de erosão, a energia cinética do projétil é diminuída com a redução da massa.

Figura 8 - Representação esquemática da penetração do projétil na cerâmica já fraturada e (b) radiografia deste instante do impacto.



Fonte: Adaptado de WOODWARD et al. (1994) e HAZELL et al. (2013).

A penetração causa o espalhamento lateral de fragmentos cerâmicos. O projétil somente avança se a cerâmica pulverizada na sua rota é empurrada para frente ou para os lados (Figura 8) (HAZELL et al., 2013; SHOCKEY et al., 1990). No caso de espalhamento, o projétil avança facilmente, sofrendo pouca erosão, levando à penetração. Quando a configuração da blindagem permite que os fragmentos se mantenham aderidos à placa de apoio, há maior desgaste no projétil (BERNOULO e SÁNCHEZ-GALVEZ, 1998).

Em placas cerâmicas de maior dimensão (monolíticas), o fluxo é impedido pelo grande confinamento das partículas e fragmentos devido à placa cerâmica intacta ao redor. Os fragmentos podem somente fluir contra o avanço do projétil, fazendo com que este seja erodido. Isso resulta em melhor desempenho balístico (GRUJICIC; PANDURANGAN; D'ENTREMONT, 2012).

Alguns autores estudaram o efeito do confinamento radial da cerâmica monolítica durante o impacto utilizando molduras ou cavidades de aço (CHI et al., 2015; ESPINOSA et al., 2000; LYNCH et al., 2006; SHERMAN; BEN-SHUSHAN, 1998; SHERMAN, 2000; SHOCKEY et al., 1990; WESTERLING, L.; LUNDBERG, 1995). Shockey et al. (1990) foram os primeiros a descrever o mecanismo de fratura nesta configuração. Os autores verificaram que a expansão é impedida pelo confinamento do aço envolta da cerâmica. O resultante aumento da pressão dificulta o fluxo de fragmentos.

Um estudo mais aprofundado, considerando a intensidade da pressão de confinamento lateral foi realizado por Sherman e Bem-Shushan (1998) e Sherman (2000). Eles estudaram condições sem confinamento, zero confinamento (presença de moldura sem exercer pressão) e confinamento com aplicação de pressão lateral utilizando velocidades de impacto de 850 m/s. Os resultados confirmaram que a presença de confinamento sem aplicação de pressão melhora o desempenho do painel, atuando no segundo estágio do impacto balístico (erosão do projétil). A aplicação de pressão biaxial (200 MPa) reduziu drasticamente o dano nas placas. O confinamento atuou já no primeiro estágio, mudando a dinâmica de formação do cone e evitando que as trincas radiais fossem totalmente formadas (SHERMAN; BEN-SHUSHAN, 1998; SHERMAN, 2000). Testes realizados por Westerling e Lundberg (1995) em maiores velocidades de impacto (1500 m/s) também resultaram em uma redução significativa da penetração para as placas confinadas atingidas. Lynch et al. (2006) observaram resultados semelhantes.

A partir do momento em que a velocidade do projétil (V_p) é igual à velocidade da interface (V_i), não há mais erosão e então a penetração ocorre com massa constante. Dependendo das condições, poderá ou não haver perfuração completa da blindagem. Em caso de não perfuração, a energia cinética restante do projétil é absorvida a partir da deformação plástica da placa de apoio, onde se observa a formação de uma depressão (“calombo”) na parte posterior da blindagem (Figura 9). Alguns autores consideram este o terceiro estágio de penetração.

A deformação excessiva da placa de apoio pode levar a consequências indesejáveis. Para blindagens pessoais, em que placas poliméricas são mais comuns, o dano colateral pode causar fraturas de ossos, ou até parada cardíaca. A depressão em painéis utilizados na proteção de equipamentos pode prejudicar seu funcionamento, tornando-os inoperantes (GONÇALVES et al., 2004). O bom desempenho da cerâmica em ambos os estágios de penetração pode evitar estes efeitos.

Figura 9 - Dano na placa de apoio de blindagem híbrida atingida.



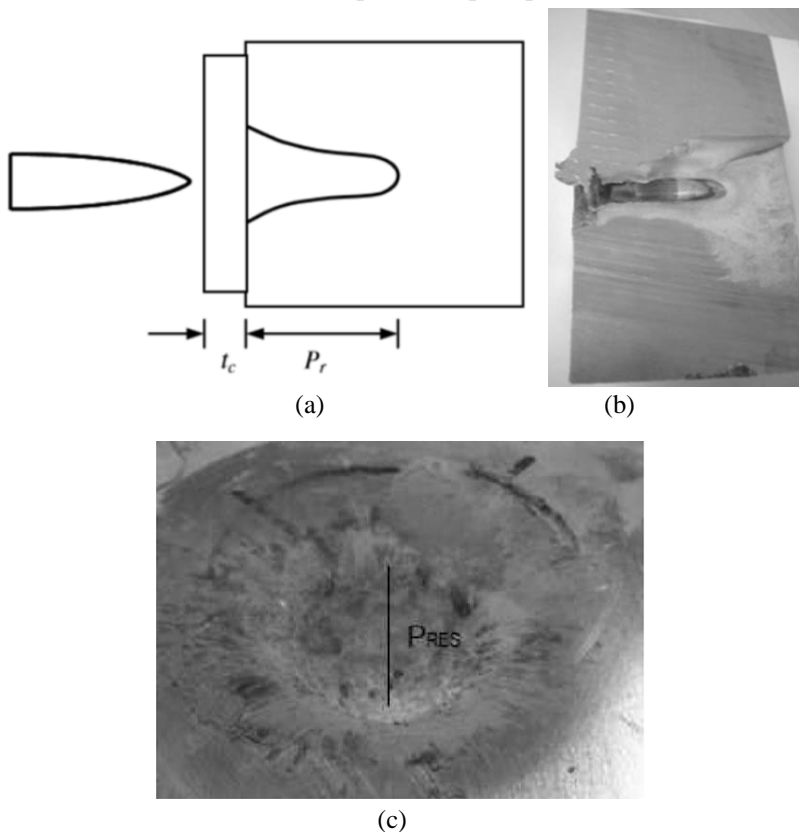
Fonte: GONÇALVES, 2000.

Quando se deseja avaliar o desempenho de cerâmicas, no entanto, utiliza-se o ensaio de profundidade de penetração. Nesse ensaio, a placa de apoio possui uma grande espessura e, após o impacto, o desempenho

da blindagem é dado pela profundidade de penetração do projétil na placa em relação à profundidade de penetração referência (sem a placa cerâmica) (MOYNIHAN; CHOU; MIHALCIN, 2000; ROZENBERG; YESHURUN, 1988).

Na Figura 10 é apresentada uma ilustração da medida de profundidade, uma imagem da placa de alumínio utilizada como referência perfurada e a placa de apoio de uma blindagem testada.

Figura 10 - (a) Ilustração de determinação da profundidade e penetração P_r (t_c é a espessura da placa cerâmica); (b) bloco de alumínio perfurado (referência) e (c) placa de apoio perfurada.

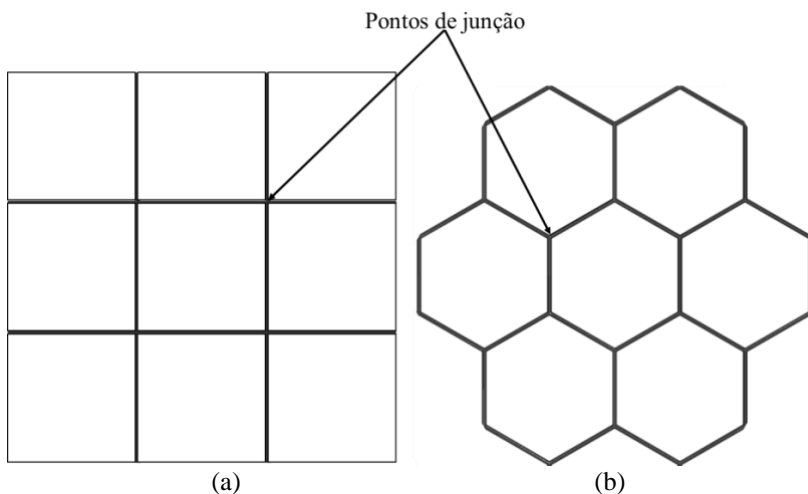


Fonte: HAZELL et al., 2008; TRINDADE, 2012.

3.4 CONFIGURAÇÃO EM MOSAICO

Considerando impactos subsequentes, é necessário manter o máximo possível de material cerâmico intacto após cada tiro. Painéis com placas cerâmicas monolíticas apresentam melhor desempenho quando atingidas por um único disparo, devido a maior distância da região de impacto em relação às bordas, que atuam confinando os fragmentos. A principal desvantagem é que o dano causado pode se estender por toda a placa, principalmente quando a ameaça for projéteis perforantes (MEDVEDOVSKI, 2010b). Blindagens com múltiplas placas (Figura 11) são geralmente empregadas por restringirem o dano à peça atingida e/ou às peças adjacentes, melhorando o desempenho do painel (GRUJICIC; PANDURANGAN; D'ENTREMONT, 2012; ZAERA; NAVARRO, 2000).

Figura 11 - Configurações usuais de painéis em mosaico: (a) placas quadradas e (b) placas hexagonais.



Fonte: Adaptado de Gonçalves, 2000.

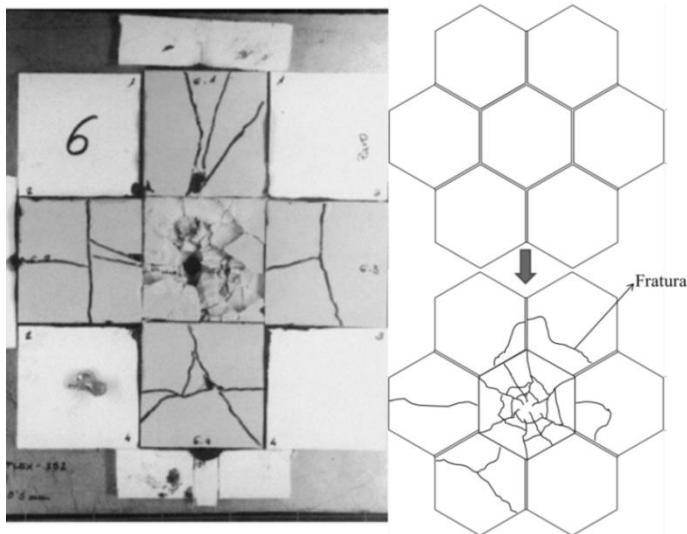
A redução do tamanho das placas cerâmicas inevitavelmente aumenta a solicitação mecânica e o número de interfaces para uma dada área, o que demanda melhor desempenho do material. Mesmo mosaicos de excelente qualidade não apresentam um encaixe perfeito, deixando as interfaces vulneráveis (HAZELL; ROBERSON; MOUTINHO, 2008).

Poucos estudos sobre o desempenho de mosaicos balísticos são encontrados na literatura.

Bless e Jurick (1998) realizaram uma análise probabilística com o intuito de avaliar como a proteção deste tipo de blindagem varia com o número de placas do mosaico para uma dada área. A falha de uma blindagem foi considerada quando o disparo aleatório atinge uma interface ou uma placa já impactada. O estudo indicou que impactos nas interfaces são bastante prováveis para as diferentes geometrias usuais (triangular, quadrada e hexagonal).

Estatisticamente, a geometria hexagonal apresenta uma vulnerabilidade de interfaces ligeiramente menor que as outras geometrias (BLESS; JURICK, 1998). Além disso, os pontos de junção em mosaicos hexagonais estão entre três placas, enquanto que para mosaicos quadrados, por exemplo, os pontos de junção compreendem quatro placas (como pode ser observado na Figura 11), o que aumenta a vulnerabilidade da blindagem (GONÇALVES, 2000).

Figura 12 - Fratura de placas adjacentes (a) mosaico atingido por projétil 7,62 AP e (b) ilustração de mosaico hexagonal antes e após impacto.



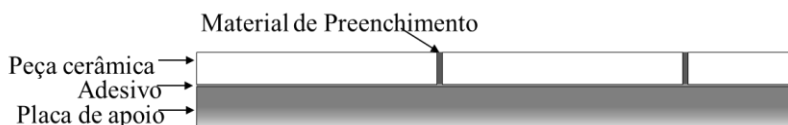
Fonte: Zaera, Navarro, 2000; O autor, 2016.

Testes balísticos em painéis com esta configuração mostraram que a profundidade de penetração do projétil na placa de apoio depende

fortemente da distância entre o ponto de impacto e a extremidade da placa, sendo maior conforme se aproxima da mesma (HAZELL; ROBERSON; MOUTINHO, 2008). Em alguns casos, a expansão dos fragmentos da placa atingida pode levar à fratura das placas adjacentes, como ilustrado na Figura 12 (ÜBEYLI; YILDIRIM; ÖGEL, 2008; ZAERA; NAVARRO, 2000).

O efeito do preenchimento dos espaçamentos entre as placas do mosaico na transmissão de ondas de tensão foi estudado numericamente por Goel et al. (2014). O mesmo fenômeno que ocorre entre a placa cerâmica, o adesivo e a placa de apoio, ocorrerá também entre interfaces de placas aderidas lado a lado, onde a atenuação se dá no sentido longitudinal. O emprego de um material de preenchimento entre as peças de mosaico transmite parte da onda de choque para as placas adjacentes e evita o contato de placa com placa no momento do impacto (WARD, 2013; GOEL et al., 2014). O material pode ainda atuar confinando os fragmentos, erodindo o projétil de modo mais eficiente. A configuração resultante seria equivalente à apresentada na Figura 13.

Figura 13 - Vista lateral da blindagem com material de preenchimento.



Fonte: O autor, 2016.

A fração da intensidade transmitida da cerâmica para o material de preenchimento depende, da mesma forma que para adesivo e cerâmica, da diferença de impedâncias acústicas. As equações apresentadas anteriormente para cálculo de tensões transmitidas e refletidas em microinterfaces também são aplicadas.

Ward et al. (US Patente nº 8424442, 2013) desenvolveram uma blindagem em mosaico, cujos espaçamentos entre 0,38 e 1,27 mm podem ser preenchidos. Os detentores da patente citam que o material utilizado no preenchimento do mosaico pode ser desenvolvido para absorver impacto por si só, e melhorar o desempenho a múltiplos tiros. Uma maior resistência pode ser adquirida adicionando reforço ao material de preenchimento. No entanto, na literatura aberta, não existem trabalhos que estudem o desempenho desta configuração (WARD, 2013).

4 METODOLOGIA

Conforme o objetivo geral e a abordagem da revisão bibliográfica, para este trabalho definiu-se o estudo de painéis híbridos alumina/alumínio em mosaico, com diferentes condições de preenchimento, sendo proposto compará-los com painéis monolíticos e investigar a influência do material de preenchimento e suas propriedades sob o desempenho dos painéis. Publicações recentes relatam que estes materiais podem melhorar a eficiência do painel balístico, porém sua influência não foi comprovada na literatura aberta.

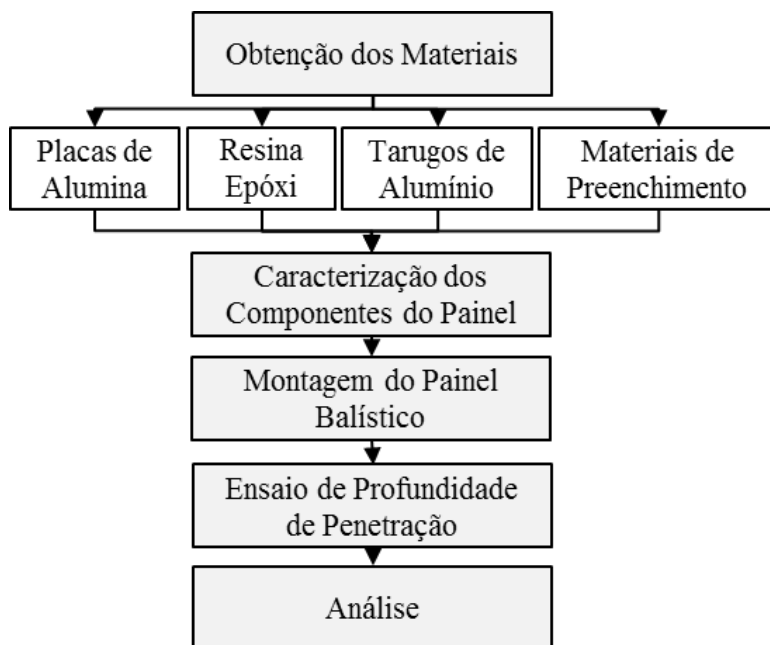
Para este estudo escolheu-se o sistema híbrido $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ em mosaico hexagonal. Este sistema é vantajoso por não ter custo elevado e apresentar bom desempenho. A alumina é uma cerâmica intrinsecamente dura e resistente, enquanto o alumínio é leve e relativamente barato. A montagem em mosaico exibe melhor desempenho a múltiplos tiros e o formato hexagonal menor vulnerabilidade em relação a outras geometrias.

O desempenho balístico foi medido para diferentes configurações do sistema. A intensidade da onda refletida para a placa cerâmica atingida pelo projétil foi variada a partir do material de preenchimento. Foram aplicadas três diferentes condições: (1) Sem material de preenchimento, onde há 100% de reflexão da onda; (2) Preenchimento I, com cerca de 90% de reflexão e (3) Preenchimento tipo II, buscando-se cerca de 80% de reflexão de ondas. Reduzindo-se a intensidade da onda refletida, se reduz a solicitação mecânica sobre placa atingida. As placas adjacentes receberiam uma porção da energia do impacto, mas insuficiente para causar dano. O desempenho também foi comparado ao de uma montagem com placas monolíticas.

As atividades do trabalho foram realizadas no Laboratório de Reatores e Processos Industriais (LabRePI), no Parque Científico e Tecnológico (I.Parque) da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC. As análises foram realizadas no Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec), Centro de Caracterização de Materiais (CeCaM) e Laboratório de Ensaios Mecânicos, todos pertencentes ao I.Parque. O ensaio balístico foi realizado no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), no Rio de Janeiro.

A seguir são descritos materiais e procedimentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa, o sistema de blindagem escolhido para estudo, bem como as técnicas para caracterização a serem empregadas. A Figura 14 traz o fluxograma do procedimento experimental.

Figura 14 - Fluxograma do procedimento experimental empregado.



Fonte: O autor, 2016.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Placas cerâmicas

As placas cerâmicas utilizadas para compor a blindagem híbrida foram de alumina comercial com 99% de pureza. O grau de pureza escolhido proporciona a maior dureza, uma das mais importantes características para cerâmicas balísticas (KRELL; STRASSBURGER, 2014; WANG; LU, 1996).

As placas foram empregadas em formato hexagonal e com oito mm de espessura. Em testes de profundidade de penetração normalmente a espessura da cerâmica é escolhida para que uma substancial penetração seja observada. No entanto, neste trabalho escolheu-se uma espessura que poderia ser futuramente empregada em blindagens.

Para a configuração monolítica, a dimensão dos hexágonos foi de 100 mm de lado, enquanto que para as placas para montagem do mosaico utilizaram-se hexágonos de 30 mm de lado.

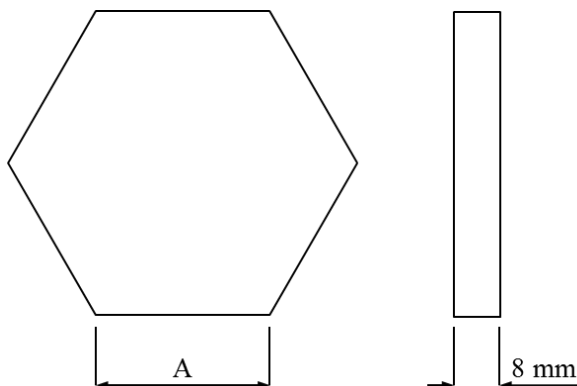
Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades da alumina, indicadas pelo fornecedor. Na Figura 15 são ilustradas as dimensões das placas.

Tabela 1 - Propriedades da alumina de acordo com o fornecedor.

PROPRIEDADES	VALOR
Al_2O_3 (%)	> 99,0
MgO (%)	< 0,8
Tamanho de Grão Primário Médio D_{50} (mm)	0,7 a 0,9
Densidade (g/cm^3)	3,8 - 3,9
Porosidade Aberta (%)	0
Coefficiente de Expansão Térmica Linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$8,3 \times 10^{-6}$
Temperatura Máxima de Uso ($^{\circ}\text{C}$)	1500
Resistência à Compressão (MPa)	2600
Resistência à Flexão (MPa)	350

Fonte: O autor, 2016.

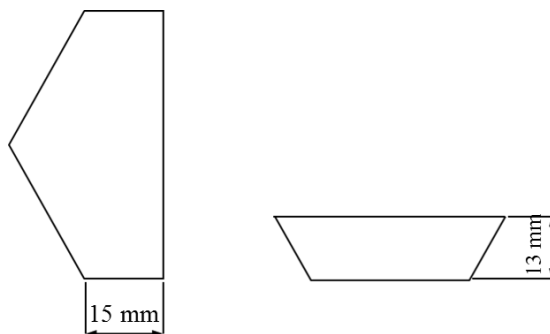
Figura 15 - Dimensões das placas de alumina hexagonais empregadas. Para a configuração monolítica $A = 100$ mm e para a configuração em mosaico $A = 30$ mm.



Fonte: O autor, 2016.

Para a montagem do painel em mosaico, fez-se necessária a aquisição de peças em formatos diferenciados, para que todas as placas adjacentes estivessem nas mesmas condições de confinamento que a placa central, simulando um painel completo. A Figura 16 ilustra estas peças.

Figura 16 - Peças hexagonais seccionadas para montagem do painel.



Fonte: O autor, 2016.

4.1.2 Placas de apoio

Tarugos cilíndricos de alumínio liga 6063 de 20,8 mm de diâmetro e 100 mm de espessura foram utilizados como placa de apoio. A dimensão é adequada para o ensaio de profundidade de penetração. Os tarugos foram solubilizados e envelhecidos para obtenção de uma dureza de aproximadamente 73 HB (ASM Handbook, 2000). A composição química da liga é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química da liga de alumínio 6063.

Elemento	% (massa)	Elemento	% (massa)
Al	Máx. 97,5	Cu	Max 0,1
Mg	0,45 - 0,9	Zn	Max 0,1
Si	0,2 - 0,6	Fe	Max 0,35
Cr	Máx. 0,1	Outros, cada	Max 0,05
Mn	Máx. 0,1	Outros, total	Max 0,15
Ti	Máx. 0,1		

Fonte: Metals Handbook, 1990.

4.1.3 Adesivo

Para a colagem das placas cerâmicas no tarugo utilizou-se resina epóxi, que é o adesivo bicomponente comumente empregado em proteções balísticas. A resina é comercialmente disponível como Araldite, produzida pela Huntsman® e distribuída pela Brascola, com equivalente de epoxido por grama (eew) de 182-192. O agente de cura é à base de poliamidas.

Na Tabela 3 são apresentadas algumas propriedades do adesivo, de acordo com fornecedor.

Tabela 3 - Propriedades da resina epóxi utilizada.

Propriedade	Valor
Densidade da Resina (g/cm ³)	1,17
Densidade do Endurecedor (g/cm ³)	0,92
Razão Resina/Endurecedor (Volume)	100:100
Razão Resina/Endurecedor (Massa)	100:80
Tempo de Trabalho (min)	60
Tempo para Manuseio (h)	7
Tempo Mínimo de Cura (h)	12
Resistência ao Cisalhamento - 72 h (MPa)	15,7

Fonte: O autor, 2016.

4.1.4 Materiais de preenchimento

Alguns materiais foram estudados para serem empregados como material de preenchimento, que estão listados na Tabela 4. Alguns deles permitiram a adição de carga, que pode alterar as propriedades de interesse.

Era desejado atingir a maior densidade e maior módulo de elasticidade possível, para que se obtivesse a maior transmissão da onda na interface. Além disso, considerou-se a facilidade de aplicação no *gap* e a fragilidade do material, que poderia levá-lo a trincar em toda a extensão do painel.

Dentre os materiais estudados, foram selecionados apenas dois para serem aplicados como preenchimento no mosaico.

Tabela 4 - Materiais de preenchimento estudados para aplicação no painel balístico.

Material	Carga	Quantidade (%)
Epóxi	-	-
	Alumina	20 ¹ 32 ¹
	Areia	67
Argamassa de Cimento Portland CP V ²		80
	Alumina	75
		67
Cimento de Zinco	-	-
Cimento Resinoso	-	-
Geopolímero	Alumina	38
		38
	Quartzo	38 ³

¹Volumétrico; ²2% de aditivo superplastificante; ³Com adição de água

Fonte: O autor, 2016.

4.1.4.1 Epóxi

Como possível material de preenchimento, utilizou-se a mesma resina epóxi empregada como adesivo entre placas cerâmicas e de apoio. Estudou-se também a adição de alumina para aumento das propriedades de módulo de elasticidade e densidade.

A alumina em pó inserida no material de preenchimento foi fornecida pela Alcoa, denominada alumina calcinada A-2G. A análise química e de tamanho de partícula são apresentadas nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5 - Análise química da alumina em pó (carga).

	Teores (%)
Al ₂ O ₃	99,1
SiO ₂	0,030
Fe ₂ O ₃	0,027
Na ₂ O	0,54
Umidade	0,15
P.F.	0,08

Fonte: O autor, 2016.

Tabela 6 - Distribuição de tamanho de partículas.

D ₉₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₁₀ (μm)	Retido em # 325 mesh (%)
23	4	2	2,3

Fonte: O autor, 2016.

Estudou-se a resina pura e também com adição de alumina nas proporções de 20 e 32 % em volume.

4.1.4.2 Argamassa de cimento Portland CP V

Buscando-se um material que apresentasse rigidez e densidade significativamente superiores à resina epóxi, estudou-se a possibilidade de preencher os painéis em mosaico com argamassa.

Dentre os cimentos disponíveis, o cimento Portland V é o que desenvolve elevada resistência em idades iniciais e, de maneira geral, maior resistência em relação a outros cimentos (ABPC, 2002). Desta forma, este cimento foi escolhido para estudo.

Foram produzidas argamassas com areia fina ABNT 7214:2015 passante em malha 60 mesh, que foi adicionada à pasta de cimento em percentual de 67% (calculado sobre a massa de cimento). Corpos de prova com alumina em substituição à areia também foram produzidos, com percentuais (em peso) de adição de 80, 75 e 67%. Para ambas as condições, a quantidade de água adicionada foi aquela suficiente para se obter uma consistência que possibilitasse a aplicação da argamassa no *gap* do mosaico. Empregou-se 2% de aditivo super-plastificante para que a necessidade de água fosse reduzida.

4.1.4.3 Materiais odontológicos

Tendo em vista as propriedades desejadas para o material de preenchimento, os materiais odontológicos poderiam ser empregados. Por serem aplicados para restauração de dentes, devem apresentar boa resistência e também trabalhabilidade, para que se adequem à cavidade a ser preenchida.

Dois materiais odontológicos foram estudados: cimento de fosfato de zinco e cimento resinoso autoadesivo. O cimento de fosfato de zinco é utilizado em restaurações e possui alto módulo de Young quando comparado com a resina epóxi, por exemplo. O cimento empregado neste trabalho (SS White) compõe-se de duas partes: (1) pó,

óxido de zinco, óxido de magnésio e corantes; e (2) líquido, ácido fosfórico, hidróxido de alumínio, óxido de zinco e água destilada. Para a preparação dos corpos de prova seguiu-se o procedimento de espaturação indicado pelo fabricante.

O cimento resinoso autoadesivo (RelyX U200, 3M) é um dos materiais com melhores propriedades mecânicas empregados em restaurações dentárias atualmente. É composto por monômeros de metacrilato contendo grupos de ácido fosfórico, partículas de carga silanizadas, iniciadores auto-polimerizáveis e fotopolimerizáveis, ésteres estabilizadores e pigmentos. O material necessita de fotopolimerização de camadas de até 2 mm de espessura.

4.1.4.4 Geopolímero

Geopolímeros são polímeros inorgânicos sílico-aluminosos, considerados como a terceira geração de cimentos. Eles são produzidos com a ativação de um material sílico-aluminoso através de uma solução fortemente alcalina, que libera monômeros de silicato e aluminato, formando um gel amorfo. O material ganha rigidez através de um processo de cura a baixas temperaturas (SINGH et al., 2015).

A incorporação de partículas de carga pode influenciar nas propriedades mecânicas do geopolímero. Partículas de quartzo e de alumina são comumente empregadas e foram utilizadas neste estudo. As partículas de alumina foram as mesmas adicionadas ao epóxi e ao cimento Portland CPV (SARKAR et al., 2015). A distribuição de tamanho de partículas de quartzo é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Distribuição de tamanho de partículas do quartzo.

D ₉₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₁₀ (μm)	Diâmetro médio (μm)
87	28	3	38

Fonte: O autor, 2016.

A fórmula de geopolímero empregada possuía relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2,4, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,3 e $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ de 7,8. As cargas foram adicionadas sobrepeso. Foi necessária a adição de água para que o material tivesse menor viscosidade e fosse aplicado nos *gaps*.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DO PAINEL

4.2.1 Placas de alumina

As placas de alumina comerciais obtidas foram caracterizadas para a determinação de propriedades relevantes de cerâmicas balísticas, para que pudessem ser comparadas com as empregadas na literatura. A descrição das técnicas utilizadas para caracterização é feita a seguir.

4.2.1.1 Densidade aparente, densidade real e porosidade total

A densidade aparente das amostras de alumina foi determinada utilizando-se o princípio de Arquimedes (em água), em uma balança Shimadzu modelo AUY 220. As peças foram impermeabilizadas utilizando-se oleofugante com 24 h de antecedência. Determinou-se a massa dos corpos de prova e, em seguida estes foram imersos individualmente em água. O valor de densidade é fornecido pelo próprio equipamento em g/cm³. Determinou-se a densidade para as amostras em mosaico e para fragmentos das placas monolíticas. Utilizaram-se cinco amostras de cada.

Para determinação da densidade real, uma das placas passou por processo de moagem até obtenção de pó passante em malha 200 mesh. O ensaio foi realizado por picnometria a hélio (Quantachrome, modelo Ultrapyc 1200e).

A porosidade foi determinada a partir dos dados de densidade aparente e densidade real, utilizando-se a equação 8.

$$P = \left(1 - \frac{d_{ap}}{d_{real}} \right) * 100 \quad Eq. (8)$$

Onde:

P = porosidade (%)

d_{ap} = densidade aparente (g/cm³);

d_{real} = densidade real (g/cm³).

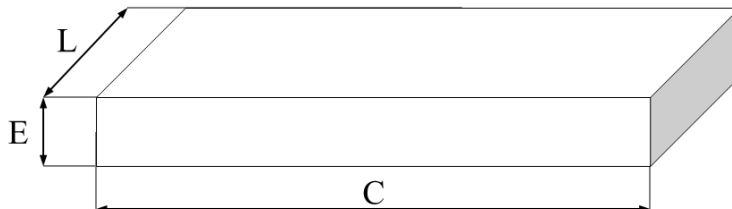
4.2.1.2 Módulo de Young, coeficiente de Poisson e impedância

A determinação do módulo de Young e coeficiente de Poisson foi realizada utilizando-se um equipamento Sonelastic (ATCP Engenharia Física), que consiste em um analisador de vibrações transitórias das

quais se extraem as frequências para o cálculo do módulo de elasticidade.

O desenho esquemático que apresenta as dimensões das amostras é visto na Figura 17.

Figura 17 - Representação esquemática das medidas dos corpos de prova para realização do módulo de elasticidade.



Fonte: O autor, 2016.

O software identifica as frequências de vibração e os respectivos amortecimentos, mediante o processamento da resposta acústica do corpo a uma excitação mecânica por impulso (um leve impacto na superfície do corpo de prova). As proporções de tamanho das amostras para a realização do ensaio foram seguidas conforme instruções do equipamento. A razão entre o comprimento (C) e a largura (L) manteve-se maior ou igual a 4, enquanto a razão entre espessura (E) e largura (L) foi menor ou igual a 8.

Devido à dificuldade de obtenção de corpos de prova nas dimensões adequadas a partir das placas cerâmicas balísticas hexagonais, foram solicitadas ao fornecedor placas retangulares, produzidas nas mesmas condições que as placas utilizadas nos painéis. A determinação do módulo de Young, módulo de resistência à flexão e tenacidade à fratura foram realizadas a partir destas amostras.

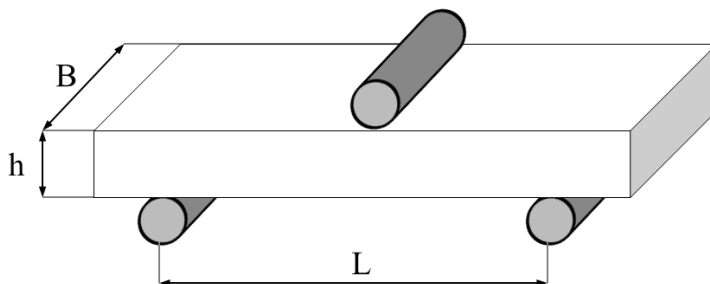
A partir dos valores de módulo de Young e coeficiente de Poisson obtidos, a impedância de choque da alumina foi calculada conforme equações 1 e 2.

4.2.1.3 Módulo de resistência à flexão

O módulo de resistência à flexão (MRF) foi avaliado a três pontos, com base na norma ASTM 1161-02. Para realização do ensaio de resistência mecânica utilizou-se uma máquina de ensaios universal EMIC DL10000. A velocidade de ensaio foi de 1 mm/min.

A Figura 18 ilustra a disposição dos corpos de prova para o ensaio de flexão em três pontos.

Figura 18 - Esquema simplificado do ensaio de flexão em três pontos



Fonte: O autor, 2016.

A resistência à flexão a três pontos foi calculada pela equação 9.

$$\sigma = \frac{3}{2} * \frac{P * L}{B * h^2} \quad Eq. (9)$$

Onde:

σ = tensão máxima de ruptura (MPa);

P = carga máxima aplicada (N);

L = espaçamento dos apoios (mm);

b = largura do corpo de prova (mm);

h = espessura do corpo de prova (mm).

4.2.1.4 Tenacidade à fratura

O ensaio de tenacidade à fratura (K_{IC}) foi realizado através do método do entalhe (SENB). O K_{IC} do material é determinado pela Equação de Griffith, equação 10.

$$K_{IC} = \sigma \cdot Y \cdot \sqrt{a} \quad Eq. (10)$$

Onde:

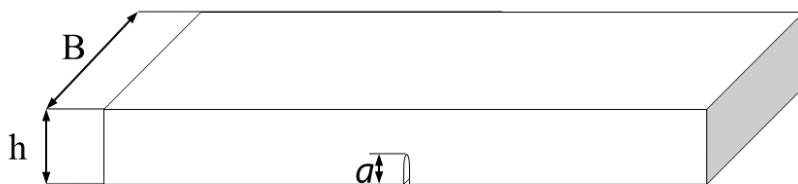
K_{IC} = tenacidade a fratura (MPa.m^{0,5});

Y = fator de forma;

a = altura do entalhe/defeito natural (m).

A Figura 19 representa o esquema das medições das amostras utilizadas o ensaio de tenacidade a fratura com entalhe.

Figura 19 - Desenho esquemático representando os corpos de prova utilizados para determinação da tenacidade à fratura.



Fonte: O autor, 2016.

O fator de forma para este tipo de entalhe é dado pela equação 11. As medias de a e h estão representadas na Figura 17.

$$Y = 1,99 - 2,47 \left(\frac{a}{b}\right) + 12,97 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 23,17 \left(\frac{a}{b}\right)^3 + 24,8 \left(\frac{a}{b}\right)^4 \quad Eq. (11)$$

4.2.1.5 Dureza por microindentação Vickers e Knoop

Uma das propriedades mais relevantes para cerâmicas balísticas contra projéteis perfurantes é a dureza. A determinação foi realizada em microdurômetro Vickers (Future Tech, FM 700), de acordo com a norma ASTM C1327 (Vickers) e ASTM C1326 (Knoop). Uma amostra retirada da placa monolítica e outra de uma peça de mosaico foram analisadas. No mínimo 5 indentações válidas foram realizadas para cada amostra, com carga de 2 kg.

As indentações foram analisadas e medidas a partir de imagens obtidas em MEV (Zeiss, EVO-MA-10).

4.2.1.6 Fragilidade e capacidade de dissipação de energia balística

A fragilidade de uma cerâmica homogênea pode ser calculada pela equação 12.

$$B = \frac{HV \cdot E}{K_{IC}^2} \quad Eq. (12)$$

Onde B é a fragilidade (m^{-1}), HV é a dureza da cerâmica (MPa), E o módulo de elasticidade (MPa) e K_{Ic} a tenacidade à fratura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$).

A capacidade de dissipação de energia balística pode ser calculada a partir da equação 13.

$$D = 0,36 \cdot B \cdot C \quad \text{Eq. (13)}$$

Sendo D a capacidade de dissipação de energia balística (s^{-1}), B a fragilidade e c a velocidade sônica no material. Os valores obtidos podem ser comparados com aluminas balísticas recentemente estudadas (MEDVEDOVSKI, 2010b).

4.2.1.7 Análise microestrutural

A análise microestrutural dos corpos de prova cerâmicos investigados foi efetuada por microscopia eletrônica de varredura - MEV, utilizando-se um equipamento Zeiss EVO-MA10, em que se fez a avaliação do tamanho de grãos. Analisaram-se as superfícies fraturadas. Antes da análise as amostras foram deixadas em lavadora ultrassônica (Branson 1800) por 15 min, secadas e recobertas com ouro. Os valores de tamanho de grão foram determinados utilizando-se as imagens de MEV obtidas, baseando-se no método de interceptação de linhas (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2010). Para a confirmação da fase cristalina identificada, realizou-se uma difração de raios-X, em equipamento Shimadzu XRD-6000, radiação $\text{CuK}\alpha$, velocidade de leitura de $1,2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$.

4.2.2 Materiais de preenchimento

De acordo com as equações para determinação de intensidade de onda refletida, transmitida e impedância, as propriedades que se deve conhecer destes materiais são densidade, módulo de Young e coeficiente de Poisson.

Corpos de prova nas dimensões adequadas para determinação de módulo de Young e coeficiente de Poisson foram confeccionados para cada material de preenchimento estudado. Os mesmos corpos de prova foram utilizados para a determinação da densidade. Os métodos e equipamentos utilizados foram os mesmos empregados para a caracterização da alumina. A preparação dos corpos de prova foi de

acordo com as recomendações do fabricante de cada material. Analisaram-se também a facilidade de aplicação do material em um *gap* de 1,2 mm e a fragilidade das amostras.

4.3 MONTAGEM DOS PAINÉIS BALÍSTICOS

A montagem dos painéis balísticos é uma etapa crítica, pois exige cuidados para se manter a homogeneidade entre os corpos de prova, tendo em vista a quantidade de variáveis existentes no ensaio balístico.

Antes do início da montagem, alguns procedimentos foram realizados para facilitar a reprodutibilidade dos resultados.

4.3.1 Preparação dos tarugos de alumínio

As superfícies de alumínio foram lixadas e desengorduradas com tolueno, durante 15 min e em seguida, limpas com detergente e água. As superfícies secas foram atacadas com uma solução de ácido sulfúrico a 25% (vol) contendo 67 g/L de dicromato de potássio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) durante 15 min a fim de formar *pits* e aumentar a área superficial. Os blocos foram lavados com detergente e álcool etílico e secados com soprador térmico.

A rugosidade superficial foi determinada após o lixamento da superfície, de acordo com norma JIS B0601-1994, com rugosímetro Mitutoyo SurfTest S-210. Medidas longitudinais e transversais ao sentido de corte foram realizadas em três corpos de provas. A rugosidade de superfícies pode influenciar na adesão da resina epóxi e, por consequência, na qualidade de adesão das placas cerâmicas. Os blocos de alumínio nos quais as placas cerâmicas foram aderidas apresentavam superfície resultante de corte em serra de fita. Os tarugos não passaram por processo de usinagem.

A penetração do projétil no bloco de alumínio depende da dureza deste. A dureza Brinell de cada tarugo foi determinada conforme norma ASTM E10 em durômetro Brinell Panantec. Foram feitas no mínimo quatro impressões em cada tarugo, duas no centro e duas na borda.

4.3.2 Montagem dos painéis monolíticos

As placas de alumina monolítica ficaram imersas em tolueno por 15 min, e em seguida foram lavadas com água e detergente e secadas com soprador térmico.

A mistura de epóxi para colagem das placas foi preparada em quantidade suficiente para formar uma camada de 1,0 mm de espessura abaixo da área da placa. Em seguida o adesivo foi distribuído na superfície das placas monolíticas e estas foram pressionadas contra a superfície dos tarugos já preparados, para evitar a formação de bolhas. A cura ocorreu em ambiente protegido de luz e umidade, por no mínimo 72 h.

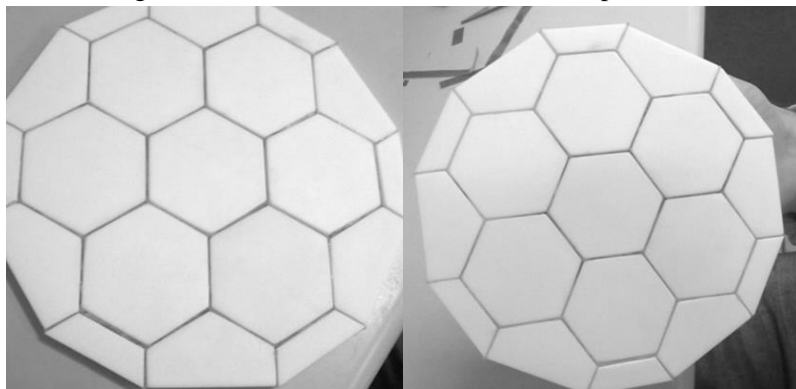
4.3.3 Montagem dos painéis em mosaico

No caso dos painéis em mosaico, a dificuldade em se obter uma homogeneidade entre os corpos de prova é maior. Primeiramente deve-se considerar o distanciamento entre as placas, que deve ser o mais homogêneo possível para facilitar a aplicação do material de preenchimento. Espaçamentos maiores levam a maior vulnerabilidade da proteção e menores espaçamentos podem prejudicar o preenchimento. A qualidade da camada adesiva também deve ser considerada; esta deve ter a mesma espessura abaixo de todas as placas e não deve apresentar bolhas. A colagem das placas do mosaico uma a uma dificultaria a obtenção de *gaps* uniformes, pois o tempo de cura do adesivo é demasiado longo e as peças se moveriam. A utilização de espaçadores poderia facilitar esta etapa, porém ainda assim seria difícil o controle da camada do adesivo para todas as peças de maneira homogênea.

A maneira que poderia possibilitar mais controle da camada adesiva seria a colagem de todas as placas de uma vez. Estudou-se a possibilidade de utilizar um gabarito, em que todas as placas seriam encaixadas e coladas na superfície. Isso evitaria que as placas se movessem lateralmente, e a homogeneidade da camada poderia ser controlada verificando-se o nível das peças em relação às outras. Porém, utilizando-se este método, o adesivo epóxi provavelmente iria transbordar entre o gabarito e as placas, e após a secagem seria impossível removê-lo para a adição do material de preenchimento.

Tendo em vista estas dificuldades, as placas adquiridas para constituir os mosaicos foram coladas umas às outras com fita dupla-face transparente VHB da 3M, cuja espessura de 1,2 mm está entre o intervalo empregado para espaçamentos de painéis balísticos (0,38-1,27 mm). A fita apresenta alta resistência a solventes, o que possibilitou a etapa de limpeza do mosaico após a colagem. A Figura 20 apresenta o mosaico montado.

Figura 20 - Mosaicos montados com fita dupla-face.



Fonte: O autor, 2016.

Com o mosaico montado, o procedimento de limpeza e colagem ocorreu da mesma forma que para as placas monolíticas. O nivelamento das peças foi verificado para manter a homogeneidade na espessura da camada adesiva. Após a cura, a fita dupla face foi removida e os *gaps* foram limpos com tolueno. A aplicação do material de preenchimento foi realizada de acordo com as condições de cada material.

4.3.2.1 Aplicação do material de preenchimento tipo I

No caso do epóxi, a mistura da resina e do endurecedor foi feita a temperatura ambiente, e os tarugos foram aquecidos com soprador térmico para que a viscosidade da cola fosse reduzida e esta escoasse com mais facilidade nos *gaps*. O material foi empurrado com auxílio de espátula até o preenchimento total dos *gaps*. Após a aplicação do material de preenchimento os corpos de prova foram protegidos de umidade e luz por 72 h.

4.3.2.2 Aplicação do material de preenchimento tipo II

Para o geopolímero, empregou-se a composição com adição de água, que teve a viscosidade reduzida em relação à composição original, para que pudesse ser aplicado. O material foi empurrado com espátula entre as placas, até que os *gaps* fossem totalmente preenchidos. Os tarugos foram embalados para proteger da umidade. A cura ocorreu em

três etapas: 24 h em temperatura ambiente, 24 h em estufa a 56°C e 24 h à temperatura ambiente. Foram produzidos corpos de prova testemunha para determinação do módulo de elasticidade e densidade no mesmo dia em que o teste balístico foi realizado. A cura total foi de 28 dias.

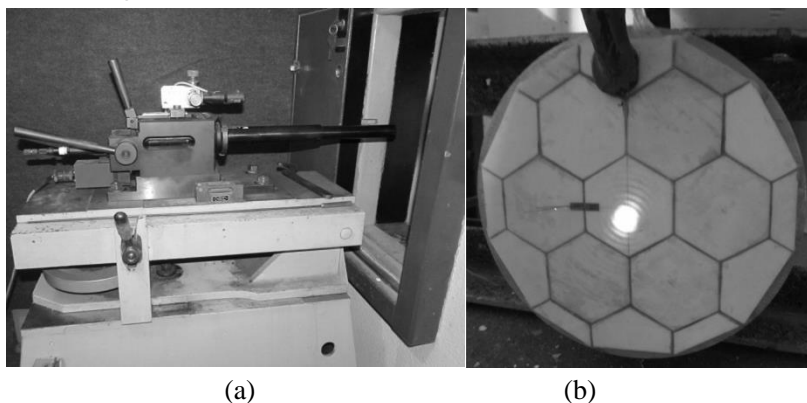
4.4 ENSAIO BALÍSTICO DE PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

O ensaio de profundidade de penetração é utilizado para investigar o desempenho balístico de cerâmicos desde 1986 e consiste na medida da penetração de um projétil em um bloco de alumínio ou aço cilíndrico (alguns polímeros já foram empregados), colado atrás do alvo que se deseja avaliar.

O ensaio balístico busca avaliar a absorção de energia pela placa cerâmica submetida ao impacto balístico. Os sistemas montados foram submetidos ao teste de profundidade de penetração D.O.P. (Depth of Penetration) para verificação da penetração máxima da munição (ROZENBERG; YESHURUN, 1988; TRINDADE, 2012)

No Brasil, os testes são realizados no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), do Centro Tecnológico do Exército (CTEx), na linha de ensaios para armas leves. Para tal, foram utilizados provetes com calibre 7,62 mm dotados de mira laser (Figura 21a e b), uma barreira óptica (Figura 22) para medida da velocidade do projétil (TRINDADE, 2012).

Figura 21 - (a) Provete calibre 7,62 mm e (b) mira laser



Fonte: O autor, 2016.

Figura 22 - Barreira óptica para determinação da velocidade do projétil.

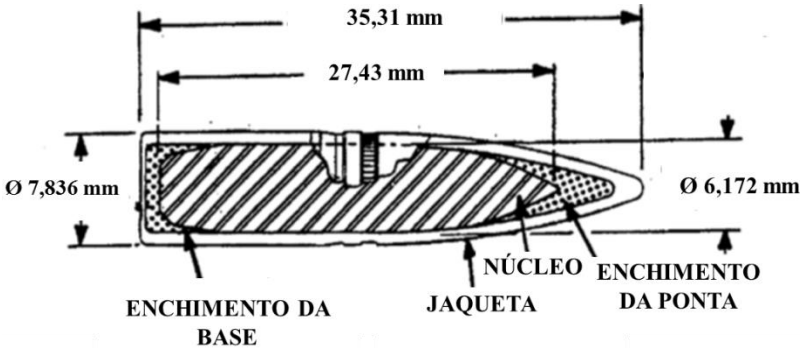


Fonte: O autor, 2016.

Conforme norma NIJ 0108.01 (*Ballistic Resistant Protective Materials*), blindagens de nível IV devem resistir a munições de 30-06 AP (informações apresentadas na Figura 23 e Tabela 8), a uma velocidade de 868 ± 15 m/s. A fim de melhor se aproximar destas condições de teste, utilizou-se a munição nacional disponível de mesmo calibre, cuja composição é muito similar (Figura 24).

Enquanto o projétil .30 AP possui jaqueta/estojo de latão com 95% de cobre, o nacional possui jaqueta de latão 70/30. O enchimento de chumbo na munição nacional está apenas na base do projétil e núcleo de aço SAE 4340 no caso do projétil nacional possui dureza de 60HRC. As dimensões do núcleo são um pouco inferiores, com comprimento total de ~24 mm e diâmetro de ~6,26 mm. Como resultado o projétil nacional apresenta menor massa, de 9,8 g (MOYNIHAN; CHOU; MIHALCIN, 2000). Desta forma, a velocidade de impacto empregada nos testes foi próxima ao limite máximo da norma para que a energia de impacto fosse semelhante. Nestas condições a energia cinética do projétil (3751 J) foi 5% inferior à mínima descrita em norma (3929 J).

Figura 23- Representação em corte de projétil .30 AP M2 (7,62 mm AP).



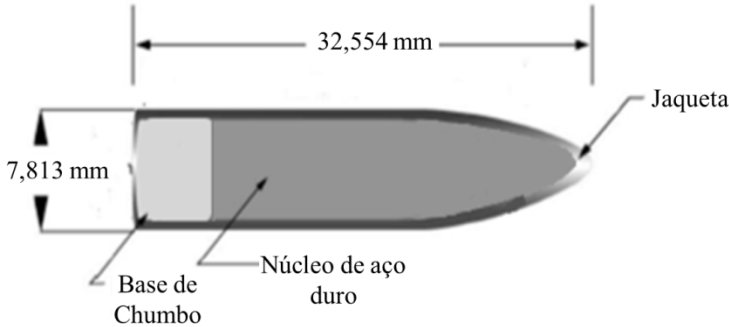
Fonte: Adaptado de Moynihan et al., 2000.

Tabela 8 - Componentes de projétil calibre .30 AP M2 (7,62 mm)

Componente	Material	Massa (g)
Jaqueta	Latão	4,2
Núcleo	Aço endurecido (63 HRC)	5,3
Enchimento da ponta	Chumbo	0,8
Enchimento da base	Chumbo	0,5
Total		10,8

Fonte: Adaptado de Moynihan et al., 2000.

Figura 24 - Projétil calibre 7,62 mm nacional.



Fonte: Adapatado de Lopes, 2012.

O desempenho balístico é avaliado por um fator adimensional, chamado de fator de eficiência balística (q^2), que combina a eficiência

da massa (E_m) e da espessura (E_t) do material. Muitas vezes considera-se apenas a E_m . Estas eficiências são calculadas pelas equações 14, 15 e 16:

$$E_t = \frac{P_{ref} - P_{res}}{T_t} \quad Eq. (14)$$

$$E_m = E_t \cdot \frac{\rho_{ref}}{\rho_t} \quad Eq. (15)$$

$$q^2 = E_m \cdot E_t \quad Eq. (16)$$

Onde, P_{ref} é a profundidade do impacto do projétil no alumínio sem a cerâmica e P_{res} é a profundidade com a cerâmica, ρ_{ref} é a densidade do alumínio e ρ_t é a densidade da cerâmica (MADHU et al., 2005).

A nomenclatura dos corpos de prova submetidos ao teste de profundidade de penetração é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Identificação dos corpos de prova submetidos ao teste balístico.

Condição	Nome	Condição	Nome
	R1		MO1
	R2	Monolítico	MO2
	R3		MO3
Referência (Tarugos de Alumínio)	R4		SP1
	R5	Mosaico Sem Preenchimento	SP2
	R6		SP3
	R7		EP1
	R8	Preenchimento Tipo I	EP2
	R9		EP3
			GP1
		Preenchimento Tipo II	GP2
			GP3

Fonte: O autor, 2016.

Após os ensaios, os corpos de prova nos quais houve penetração foram cortados e fresados cuidadosamente para a determinação da

profundidade de penetração. Nos corpos de prova onde houve deslocamento efetuaram-se medidas de espessura de camada adesiva com equipamento Instrutherm ME-240.

4.4.1 Medida da onda de tensão

Buscando-se mapear a transmissão da onda de tensão gerada após o impacto nos painéis, foram analisadas algumas informações antes da instalação dos *strain-gages*.

Considerando-se a velocidade da onda na cerâmica de $10,3 \times 10^3$ m/s (calculada com a equação 1) e a distância do ponto de impacto até a posição de instalação do *strain-gage* (24 mm), o tempo necessário para a onda de tensão passar pelo SG é de 2,3 μ s.

De acordo com Den Reijer (1991), o tempo de fratura da cerâmica, t_{cone} (tempo para a formação de todo o cone de fraturas) depende do tempo necessário para a frente de fratura radial que segue a onda compressiva refletida atravessar a cerâmica. Ele é determinado pela equação 17.

$$t_{cone} = \frac{h_c}{u_{cer}} + \frac{h_c}{v_{trincas}} \quad Eq. (17)$$

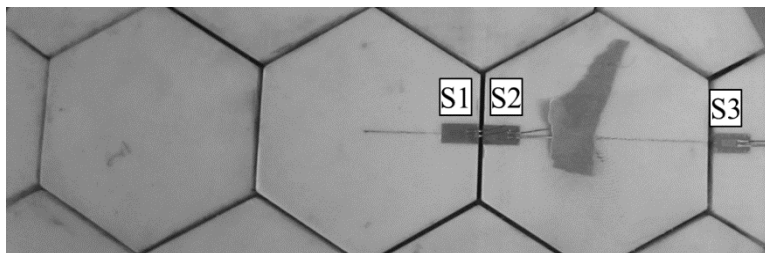
Onde h_c é a espessura da cerâmica, u_{cer} é a velocidade da onda compressiva longitudinal e $v_{trincas}$ é a velocidade da frente de fratura. Esta última pode variar de 1/3 a 1/6 da velocidade da onda, porém Den Reijer propôs um valor de 1/5 para se adequar aos cálculos de Wilkins (1978). Desta forma o t_{cone} pode ser determinado por 18.

$$t_{cone} = \frac{6h_c}{u_{cer}} \quad Eq. (18)$$

O tempo para formação do cone de fraturas é, então, de 4,7 μ s. O tempo para que a onda atinja o sensor de deformação é inferior ao tempo para a formação do cone, indicando a possibilidade de leitura da onda antes do rompimento da placa ou *gage*.

Visando-se observar o comportamento da onda de tensão na placa monolítica, *strain-gages* foram instalados a 21 e 75 mm do centro da placa. Para as três condições de mosaico, *strain-gages* foram instalados antes e após o *gap*, conforme Figura 25.

Figura 25 - Posição dos *strain-gages* nos painéis em mosaico: S1 extremidade da peça, S2 logo após o *gap* e S3 após o segundo *gap*.



Fonte: O autor, 2016.

A coleta de dados foi feita com Sistema de Aquisição e Gravação de Dados Genesis High Speed da HBM, a uma taxa de 1 MHz.

4.4.2 Câmera de alta velocidade

O momento de impacto do projétil no painel foi observado para o tarugo referência, painel monolítico e painel sem material de preenchimento com uma câmera de alta velocidade (Fastec, HiSpec 4). A velocidade de captação de imagem foi de 11222 a 28772 fps (*frames per second*). Não foi possível obter imagens de outros corpos de prova devido à vulnerabilidade da câmera aos estilhaços gerados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos nos itens subsequentes.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ALUMINA

5.1.1 Densidade aparente, densidade real e porosidade total

Os resultados de densidade aparente, real e porosidade total das amostras de alumina monolítica e mosaico estão apresentados na Tabela 10. Como pode-se observar, a densidade da placa monolítica é inferior à encontrada para as amostras de mosaico analisadas.

Tabela 10 - Densidade aparente, real e porosidade total das placas de alumina.

	Densidade Aparente (g/cm ³)	Densidade Real (g/cm ³)	Porosidade Total (%)
Monolítica	3,76 ± 0,03	4,01 ± 0,01	6,3
Mosaico	3,88 ± 0,01		3,2
AL97 ¹	3,74-3,76	-	-
AL98 ¹	3,78-3,82	-	-
AL98,5 ¹	3,81-3,84	-	-
AL99,7 ¹	3,90-3,91	-	-

¹Medvedovski (2010a).

Fonte: O autor, 2016.

A diferença é provavelmente decorrente do processo produtivo. Há uma maior dificuldade de prensagem e sinterização de peças de maior dimensão. Em relação às propriedades balísticas, esta variação pode ser responsável por diferenças no desempenho balístico entre aluminas, que poderá ser verificado na capacidade de dispersão de energia balística (no item 5.1.3).

Esta característica poderá interferir na comparação entre as placas monolítica e de mosaico, mas não no desempenho entre as diferentes configurações em mosaico, não prejudicando as principais inferências realizadas neste trabalho.

Ainda, constata-se que a densidade das placas em mosaico está entre os valores encontrados por Medvedovski (2010a) para placas

balísticas de alumina de pureza 98,5 e 99,7%, estando coerente com a pureza com as placas adquiridas, que é de 99%. No caso da alumina monolítica, pode ser comparada com placas balísticas de pureza 97%.

5.1.2 Módulo de Young, coeficiente de Poisson e impedância

Conforme exposto no procedimento experimental, foram solicitadas peças nas dimensões adequadas para a medida das propriedades de módulo de Young e coeficiente de Poisson. A obtenção de corpos de prova a partir das placas monolíticas ou mosaico seria demasiado cara e trabalhosa.

Os resultados de módulo de Young e coeficiente de Poisson obtidos a partir da medida com a técnica de excitação por impulso estão expostos na Tabela 11. Os valores de velocidade sônica e impedância são calculados conforme equações 1 e 4.

Tabela 11 - Módulo de Young, coeficiente de Poisson, velocidade sônica e impedância.

Amostra	Módulo de Young (GPa)	Coeficiente de Poisson	Velocidade Sônica (10^3 m/s)	Impedância (10^6 kg/s/m ²)
Estudada	366 ± 2	0,23	10,5	40,6
AL97 ¹	280-300	-	9,5-9,9	35,5-37,2 ²
AL98 ¹	325-360	-	10,0-10,5	37,8-40,1 ²
AL98,5 ¹	370-420	-	10,6-11,3	40,4-43,4 ²
AL99,7 ¹	400-450	-	10,7-11,6	41,7-45,4 ²

¹Medvedovski (2010a); ²Calculada a partir de valores mínimos e máximos de velocidade sônica e densidade publicados por Medvedovski (2010a).

Fonte: O autor, 2016.

Observa-se que os valores de módulo de Young e de impedância encontrados estão entre os valores das aluminas balísticas de 98 e 98,5% de pureza apresentados na literatura. Verifica-se, por parte das placas adquiridas, um desempenho um pouco inferior ao de aluminas de mesmo grau de pureza.

A densidade destas placas foi determinada, e verificou-se o mesmo valor obtido para as placas em mosaico avaliadas no item anterior.

Sabe-se que o módulo de Young está diretamente relacionado com a porosidade de um corpo sólido. De acordo com Asmani et al. (2001), o módulo de Young da alumina está relacionado com a porosidade segundo a Equação 18 (ASMANI et al., 2001).

$$E = -933,58x + 396,07 \quad Eq. (18)$$

Onde E é o módulo de Young e x é a porosidade da amostra. A partir desta equação é possível determinar o módulo de Young para ambas as amostras, a de mosaico e também a amostra monolítica, que apresentou maior porosidade. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Asmani et al. (2001) também observaram pouca variação no coeficiente de Poisson para porosidades de até 12%. O valor medido para a amostra estudada foi de 0,23, o mesmo encontrado pelos autores. Logo, para o cálculo de impedância, foi considerado um valor de 0,23 para ambas as amostras. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Módulo de Young, coeficiente de Poisson, velocidade sônica e impedância para as placas de mosaico e monolítica.

Amostra	Módulo de Young (GPa)	Coeficiente de Poisson	Velocidade Sônica (10^3 m/s)	Impedância (10^{-6} kg/s/m ²)
Mosaico	366	0,23	10,5	40,6
Monolítica	337	0,23	10,2	38,3

Fonte: O autor, 2016.

O valor de módulo de Young encontrado a partir da equação 12 é equivalente ao medido para as amostras retangulares solicitadas, mostrando que, para a densidade encontrada, este valor está coerente com a previsões de Asmani et al. (2001). O módulo calculado para as placas monolíticas é inferior, porém praticamente se enquadra na mesma categoria das placas de mosaico.

Uma menor impedância reduzirá o descasamento nas interfaces cerâmica/adesivo e cerâmica/placa de apoio (que possuem módulos de Young muito inferiores), aumentando a intensidade da onda transmitida para o alumínio e material de preenchimento. A impedância é proporcional à densidade e à velocidade sônica, sendo evidente que uma menor densidade reduzirá este valor. Neste caso, menor densidade estará

relacionada com maior porosidade. Poros são microinterfaces, responsáveis por reflexões e transmissões de onda, que a atenuam. Por outro lado, a porosidade ocasiona redução da resistência mecânica. De qualquer modo, a diferença entre as propriedades não é significativa, podendo não alterar o desempenho da cerâmica.

Em suma, as propriedades de ambas as placas são comparáveis às aluminas balísticas de 98%. Isso é coerente com a especificação das aluminas, que é a mesma para ambas, de 99% de pureza.

5.1.3 Módulo de Resistência à Flexão e Tenacidade à Fratura

A resistência mecânica de cerâmicas balísticas é uma característica importante para armaduras. Rozenberg e Yeshurun (1988) estudaram o desempenho balístico de diferentes cerâmicas (entre elas, duas aluminas) e concluíram que a eficiência balística tem uma relação linear com a resistência mecânica à compressão. A determinação da resistência à compressão, entretanto, não é comum para cerâmicas, sendo o módulo de resistência à flexão mais utilizado. A determinação da resistência mecânica à flexão é importante, pois pode apontar a existência de defeitos nas placas produzidas, que irão reduzir o desempenho da blindagem.

A tenacidade à fratura do material é a habilidade que este tem de resistir à fratura quando há uma trinca pré-existente. Da mesma forma que o módulo de resistência à flexão, pode indicar a existência de defeitos que prejudiquem seu desempenho mecânico.

O módulo de resistência à flexão e a tenacidade à fratura determinados para a alumina estudada são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Módulo de resistência à flexão e tenacidade à fratura.

Alumina	Módulo de Resistência à Flexão (MPa)	Tenacidade à Fratura (MPa.m ^{0,5})
Estudada	240 ± 15	3,6 ± 0,4
AL97 ¹	-	3,0-3,3
AL98 ¹	250-350	3,2-3,3
AL98,5 ¹	270-360	3,3-3,4
AL99,7 ¹	320-380	3,1-3,4

¹ Medvedoviski, 2010a.

Fonte: O autor, 2016.

Comparando-se os valores obtidos com os publicados na literatura, verifica-se que a tenacidade à fratura da alumina estudada, de $3,6 \pm 0,4 \text{ MPa.m}^{0,5}$ é bastante similar. O módulo de resistência à flexão, entretanto, encontra-se próximo ao limite mínimo da alumina com a menor de pureza estudada por Medvedovski (2010). Considerando a densidade da placa de alumina, a menor resistência observada não pode estar relacionada com a presença de porosidade. Uma relação com o tamanho de grão é feita no tópico 5.1.6.

5.1.4 Dureza por Microindentação Vickers e Knoop

Os resultados de dureza por microindentação Vickers e Knoop da alumina estudada são apresentados na Tabela 14. As indentações realizadas em microdurômetro Vickers e Knoop foram medidas a partir de imagens de MEV, exibidas na Figura 26.

De acordo com Swab (2004) a dureza de cerâmicas depende da carga aplicada, devido ao efeito do tamanho da indentação (ISE). Maiores cargas são melhores para a determinação da dureza por microindentação, pois tendem a minimizar este efeito (SWAB, 2004). O autor ainda sugere que o indentador Knoop é o mais adequado para determinação de dureza de cerâmicas balísticas, por apresentar menor erro no resultado.

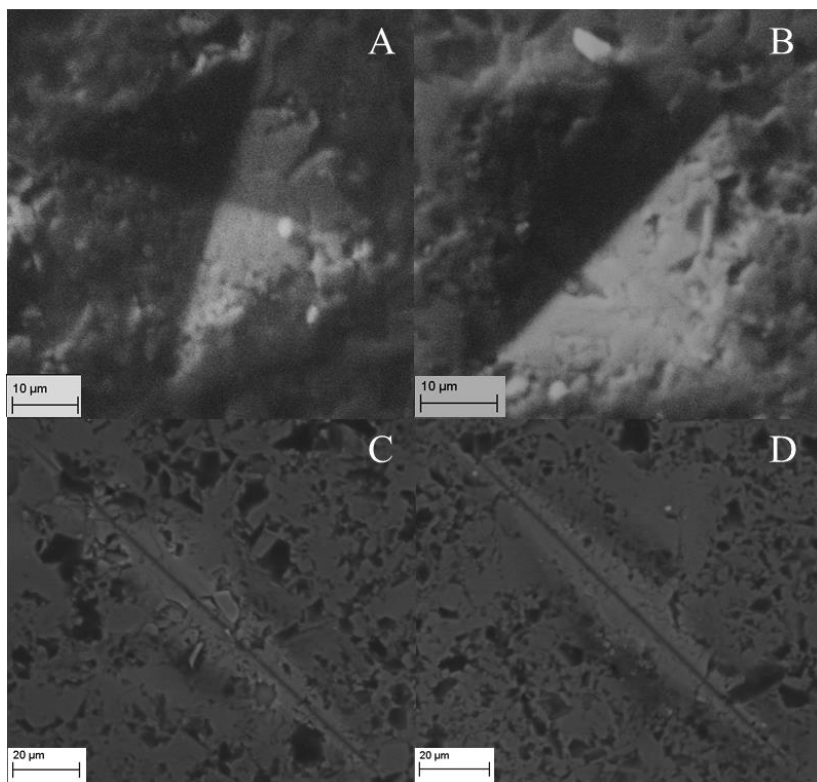
Tabela 14 - Dureza por microindentação Vickers e Knoop da alumina comercial estudada e aluminas balísticas.

	Dureza	
	Vickers (GPa)	Knoop (GPa)
Monolítica	$13,7 \pm 0,8$	$13,5 \pm 1,6$
Mosaico	$14,4 \pm 0,5$	$14,2 \pm 1,5$
AL97 ¹	12,1-12,4	-
AL98 ¹	12,0-13,0	-
AL98,5 ¹	12,9-14,2	-
AL99,7 ¹	14,9-15,3	-
AL99,5 ²	-	13,8

¹ Medvedoviski, 2010 (HV10); ² Swab, 2004 (2 kg)

Fonte: O autor, 2016.

Figura 26 - Microindentações Vickers nas amostras de alumina (a) monolítica e (b) mosaico e Knoop em (c) monolítica e (d) mosaico.



Fonte: O autor, 2016.

O valor médio de dureza Vickers foi de 13,7 e 14,4 GPa para as amostras monolítica e mosaico respectivamente, enquanto que o valor de dureza Knoop foi de 13,5 e 14,2 GPa, ambos com carga de 2 kgf. Ao contrário do proposto por Swab (2004), os valores de dureza Knoop apresentaram maior variação para ambas as amostras. A dificuldade de se medir com precisão o comprimento das indentações justifica este comportamento. As durezas apresentadas pela placa cerâmica comercial utilizada são comparáveis às observadas para a alumina 98,5% por Medvedovisk (2010a).

Krell e Strassburger (2014) afirmaram que valores de dureza HV10 (10 kg) podem ser relacionados com o limite elástico de Hugoniot (LEH), ou seja, o limite de tensão suportada por um sólido comprimido

por choque unidimensional sem que ocorra deformação irreversível na frente de choque. Esta propriedade é determinada por diversos autores por estar relacionada com o comportamento da cerâmica no impacto. Para aluminas, o efeito de tamanho de indentação é praticamente desprezível entre as cargas de 19,6 N (2 kg) e 98 N (10 kg), significando que podem ser comparados com valores de HV10 (SWAB, 2004).

De acordo com o estudo feito pelos autores, a maioria das cerâmicas balísticas apresentou uma boa correlação entre LEH e a dureza Vickers. Considerando a dureza média encontrada para as amostras sendo de 14 GPa (que coincide com uma das aluminas estudadas pelos autores) o LEH seria de $\sim 9,5$ GPa. (KRELL; STRASSBURGER, 2007). A partir desta informação, a determinação do LEH pode ser evitada, já que se trata de uma técnica mais cara, de difícil acesso e que tem forte correlação com a dureza Vickers (KRELL; STRASSBURGER, 2014).

5.1.5 Fragilidade e Capacidade de Dissipação de Energia

A fragilidade e capacidade de dissipação de energia são propriedades utilizadas por Medvedovski (2010a) para comparar o desempenho de cerâmicas balísticas.

Tabela 15 - Fragilidade e capacidade de dissipação de energia.

	$B \times 10^{-8} (\text{m}^{-1})$	$D \times 10^{-12} (\text{s}^{-1})$
Monolítica	$3,6 \pm 0,8$	$1,3 \pm 0,3$
Mosaico	$4,0 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,3$
AL97	3,40-3,80	1,70-1,95
AL98	3,70-4,30	1,50-1,60
AL98,5	4,20-4,60	1,80-1,95
AL99,7	5,25-5,45	2,20-2,40

Fonte: O autor, 2016.

De acordo com os dados obtidos, determinaram-se os valores de B e D e os respectivos erros propagados (Tabela 15). Os resultados encontrados para a fragilidade foram $(3,6 \pm 0,8) 10^8 \text{ m}^{-1}$ para a placa monolítica e $(4,0 \pm 0,9) 10^8 \text{ m}^{-1}$ para a placa de mosaico. A capacidade de dissipação da energia balística foi de $(1,3 \pm 0,3) 10^{12} \text{ m}^{-1}$ e

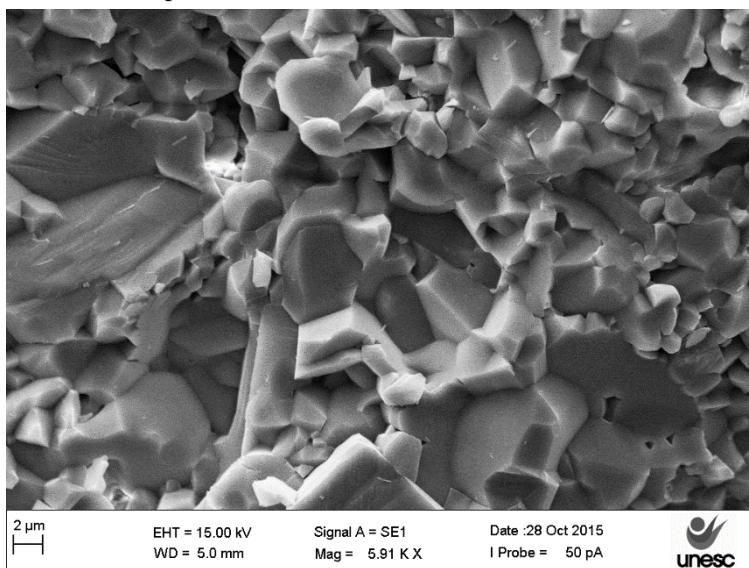
$(1,5 \pm 0,3) 10^{12} \text{ m}^{-1}$ para a monolítica e mosaico, respectivamente. Assim como para as outras propriedades determinadas, os valores encontrados são próximos aos da alumina de 98% de pureza encontrados na literatura.

Ainda, considerando o erro propagado, os valores de fragilidade e capacidade de dissipação de energia das placas monolítica e em mosaico são estatisticamente equivalentes.

5.1.6 Análise Microestrutural

As Figuras 27 e 28 são as imagens obtidas por MEV para análise da microestrutura. A presença de fase cristalina coríndon foi confirmada com a análise de DRX da Figura 29. As informações referentes ao tamanho de grão são mostradas na Tabela 16.

Figura 27 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da superfície fraturada da amostra monolítica.

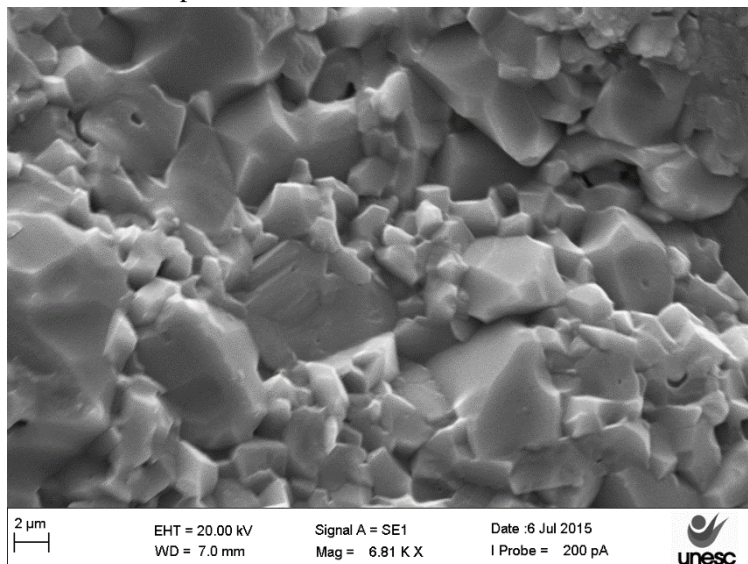


Fonte: O autor, 2016.

A microestrutura de aluminas consiste de grãos de coríndon, como fase majoritária, ligados por uma pequena quantidade de cristais de anortita, espinélio e/ou fase vítrea a base de silicato. Nas imagens é

possível observar grãos de coríndon, mas não se observa cristais de anortita ou fase vítrea próximos aos contornos de grão. Uma análise de EDS da região não detectou a presença de tais fases secundárias.

Figura 28 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura da superfície fraturada da amostra mosaico.

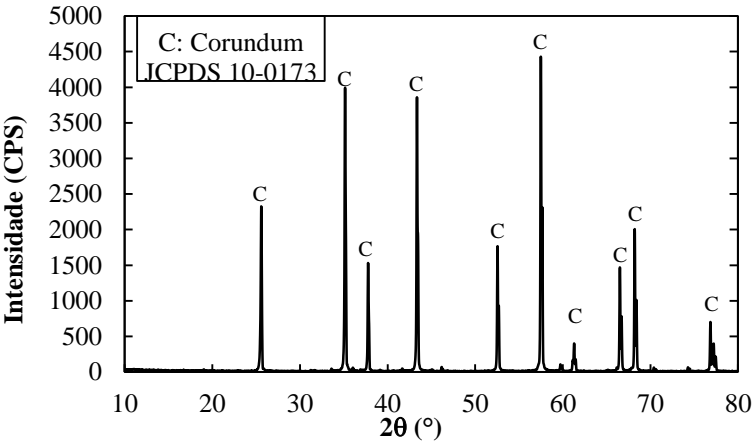


Fonte: O autor, 2016.

As imagens não apontaram a presença de impurezas ou fases secundárias que poderiam contradizer a pureza indicada pelo fabricante. Em ambas as amostras, monolítica e mosaico, observa-se uma microestrutura composta por grãos grandes e pequenos, dispersos. Isso aponta para uma dispersão significativa de tamanho de partículas precursoras. Por conta de a análise ser da superfície de fratura, há certa dificuldade em se verificar porosidade nas amostras, porém observam-se pequenos poros localizados entre contornos de grãos, em ambas as imagens.

Uma análise de difração de raios-X foi realizada para confirmar a fase cristalina identificada. A Figura 29 apresenta o gráfico obtido, no qual identifica-se a fase Córinton, JCPDS 10-0173, conforme citado anteriormente.

Figura 29 - Difração de raios-X da amostra em mosaico.



Fonte: O autor, 2016.

De acordo com a Tabela 16, o tamanho de grão médio para ambas as amostras foi de aproximadamente 3 µm. Para a amostra de mosaico analisada, os tamanhos variaram entre 1 e 17 µm. Para a amostra monolítica, o maior tamanho observado foi de 19 µm. O tamanho de grão é praticamente equivalente.

Tabela 16 - Tamanho de grão das amostras analisadas.

Amostra	Tamanho de Grão (µm)		
	Médio	Máximo	Mínimo
Monolítica	3,2	17,6	1
Mosaico	3,3	19,4	1
AL99,5 ¹	5,7	31,1	1
AL99,7 ²	1-6	-	-

¹ Swab, 2004; ²Medvedovski, 2010.

Fonte: O autor, 2016.

Entende-se que menores tamanhos de grão dão mais resistência à cerâmica, e portanto, seriam desejáveis. Por este ponto, a alumina nacional apresenta tamanhos de grão variados, mas inferiores aos observados por Swab (2004), que são referentes à alumina balística do fornecedor Coorstek. Porém, de acordo com Krell e Strassburger (2007),

a análise desta propriedade com a eficiência balística não mostrou relação, sendo secundária para o desempenho balístico.

Esta propriedade é importante para a resistência mecânica, no entanto. O tamanho médio de grão observado nas aluminas estudadas por Medvedoviski (2010) variou de 1-6 μm , sendo ausentes nas imagens de MEV grãos maiores como os observados na alumina nacional. Isso justificaria a maior resistência mecânica.

5.2 ESCOLHA DO MATERIAL DE PREENCHIMENTO

Os corpos de prova obtidos a partir dos materiais de preenchimento foram caracterizados quanto ao módulo de Young, densidade, para determinação da impedância. Observou-se também a forma de aplicação, para verificar a viabilidade de empregá-los.

A Tabela 17 apresenta um resumo das características apresentadas pelos mesmos.

Tabela 17 - Materiais estudados para serem empregados como material de preenchimento.

Material	Carga	(%)	Densidade (g/cm ³)	E (GPa)	Forma de Aplicação
Epóxi	-	-	1,08 \pm 0,01	2,7 \pm 0,1	Fácil
	Alumina	20 ¹	1,47 \pm 0,02	3,4 \pm 0,1	Difícil
		32 ¹	1,58 \pm 0,02	3,9 \pm 0,2	Difícil
Cimento Portland CP V ²	Areia	67	1,71 \pm 0,03	14 \pm 1	Fácil, porém trinca com facilidade e é friável
		80	2,09 \pm 0,03	5,4 \pm 0,5	
	Alumina	75	1,32 \pm 0,04	5,7 \pm 0,8	
		67	1,25 \pm 0,03	6,7 \pm 0,4	
Cimento de Zinco	-	-	2,77 \pm 0,02	22,4 ⁴	Muito difícil
Cimento Resinoso	-	-	2,11 \pm 0,02	6,6 ⁵	Muito difícil
Geopolímero	Alumina	38	1,72 \pm 0,01	13 \pm 1	Difícil
	Quartzo	38	1,80 \pm 0,01	17 \pm 1	Difícil
		38 ³	1,64 \pm 0,01	11 \pm 2	Moderada

¹Volumétrico; ²2% de aditivo superplastificante; ³Com adição de água; ⁴El-Anwar et al. (2015); ⁵Informação fabricante.

5.2.1 Resina epóxi

A resina epóxi pura apresentou densidade de $1,08 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ e um módulo de Young de 2,7 GPa. A densidade apresentou-se inferior a encontrada na literatura ($1,20 \text{ g/cm}^3$) provavelmente devido às bolhas que não puderam ser removidas com a aplicação de vácuo (ADACHI et al., 2008). Por consequência, o módulo medido também foi inferior ao citado em outros trabalhos (3,2-3,7 GPa) (DITTANET; PEARSON, 2012; IMANAKA et al., 2001; TILBROOK; MOON; HOFFMAN, 2005). A aplicação da resina pura é facilmente realizada com aquecimento. A resina escoou, preenchendo os *gaps*.

A inserção de partículas de alumina em 20% e 32% contribuiu para o aumento da densidade ($1,47$ e $1,58 \text{ g/cm}^3$) e também para o módulo (3,4 e 3,9 GPa). A adição de carga, porém, alterou drasticamente a viscosidade da resina, impossibilitando sua aplicação. Ainda, o aumento da impedância em relação à resina pura não é significativo. Para o maior percentual de carga, a transmissão de ondas seria de 14%, contra 9% da resina (calculados com equações 1 e 3).

5.2.2 Materiais odontológicos

A resina odontológica utilizada apresentou densidade de $2,11 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ e módulo de elasticidade de 6,6 GPa de acordo com o fabricante (não foi possível obter corpos de prova nas dimensões adequadas para determinação do módulo). Comparada com a maioria dos materiais, apresentou propriedades de densidade e módulo de Young superiores, o que resultariam em maior impedância e por consequência, maior transmissão de ondas de choque.

A densidade apresentada pelo cimento de zinco estudado foi de $2,77 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, sendo bem superior aos outros materiais. O módulo de Young não pode ser medido devido à dificuldade de obtenção de corpos de prova no tamanho adequado. A excessiva fragilidade do material resultava na quebra das amostras. Entretanto, o módulo do cimento de fosfato de zinco encontrado na literatura foi de 22,4 GPa (EL-ANWAR et al., 2015). Este valor pode variar de acordo com o conteúdo de sólidos e procedimento de mistura, mas de modo geral é superior aos demais materiais estudados. Estas propriedades fariam do cimento de fosfato de zinco o material com maior impedância, e, portanto, o que apresentaria a maior transmissão de onda para as placas

adjacentes. Utilizando-se as equações 1 e 3, encontra-se um valor de 40% de transmissão.

Apesar de apresentarem propriedades interessantes, os materiais odontológicos são difíceis de aplicar. O cimento de zinco precisa ser preparado em etapas, com um procedimento de espatulação para evitar aprisionamento de bolhas e garantir a homogeneização. Além disso, a cura é demasiado rápida e o material excessivamente frágil. Essas características impossibilitam um preenchimento adequado, produzindo uma interface cerâmica/preenchimento defeituosa. Desta forma, o valor de 40% de transmissão seria apenas estimado, não podendo ser obtido de fato.

No caso do cimento resinoso, há a necessidade de fotopolimerização, cuja profundidade máxima de cura do processo é de 2 mm. Seria necessário aplicar quatro camadas de resina, aumentando muito o tempo de preparo, além de não garantir a qualidade do mesmo. Sua característica pastosa dificulta sua inserção no *gap*.

5.2.3 Argamassas de cimento Portland V

Durante a produção dos corpos de prova de argamassa, apesar da utilização de superplastificante, houve a necessidade de se adicionar grande quantidade de água. Isso ocorreu devido ao tamanho de partícula reduzido (maior área superficial), tanto do cimento, como das cargas. Como resultado, todas as amostras exibiram porosidade e friabilidade. O resultado de módulo observado para os corpos de prova confeccionados com areia, de 14 GPa, gerou dúvida sobre sua confiabilidade tendo em vista as condições da amostra. De fato, o método de excitação por impulso é bastante sensível às irregularidades na superfície, e desta forma este resultado não foi considerado.

As amostras de argamassa com alumina apresentaram densidade variando de 1,25 a 2,09 g/cm³ e módulos de até 5,4 a 6,7 GPa. Apesar de apresentar resultados superiores ao epóxi, por exemplo, a porosidade e a facilidade de desintegração destas amostras comprometeram sua aplicação como material de preenchimento.

5.2.4 Geopolímero

Os testes realizados com geopolímero indicaram que o módulo de Young obtido com a carga de quartzo (17 GPa) foi superior ao obtido com a adição de partículas de alumina (13 GPa). A densidade para o

geopolímero com adição de quartzo também foi superior ($1,8 \text{ g/cm}^3$). A aplicação sem a redução da viscosidade da massa, no entanto, era difícil. Desta forma, adicionou-se água à composição com quartzo até que a viscosidade possibilitasse o preenchimento. Como resultado, obteve-se um material com módulo de Young de $11,2 \text{ GPa}$ e densidade de $1,64 \text{ g/cm}^3$. Comparado-se com os outros materiais, este é o que apresenta as melhores propriedades para aplicação no painel.

5.2.5 Materiais selecionados

Considerando-se as características analisadas e o objetivo deste trabalho, foram escolhidos como materiais de preenchimento: (1) resina epóxi pura e (2) geopolímero com carga de quartzo e viscosidade reduzida.

As propriedades de ambos os materiais estão apresentadas na Tabela 18, conforme equações 1, 3 e 4. Verifica-se que a intensidade da onda transmitida é de 0,09 para o epóxi e 0,20 para o geopolímero.

Tabela 18 - Propriedades dos materiais de preenchimento escolhidos e respectivas intensidades de onda refletida para a cerâmica.

Propriedade	Epóxi	Geopolímero
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,7	11,2
ρ (kg/m^3)	1080	1642
Coefficiente de Poisson	0,30	0,17
Intensidade da Onda Incidente (σ_i)	1	1
Intensidade da Onda Refletida (σ_r)	-0,91	-0,80
Intensidade da Onda Transmitida (σ_t)	0,09	0,20

Fonte: O autor, 2016.

5.3 ENSAIO BALÍSTICO

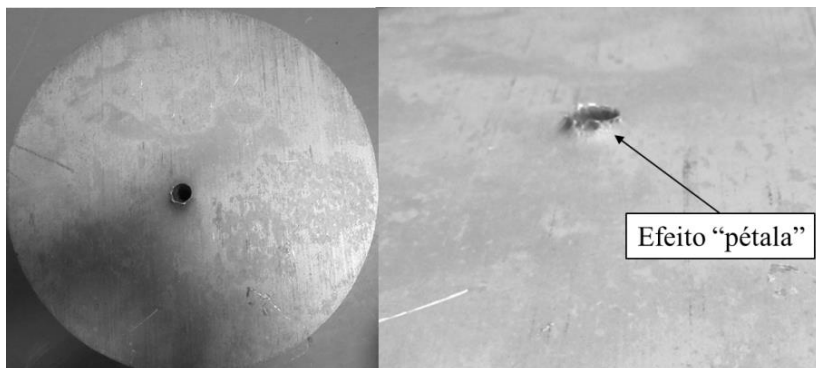
5.3.1 Blocos de Referência (Tarugos de Alumínio)

A rugosidade determinada para a superfície dos tarugos foi de $R_a = 4,6 \mu\text{m}$ no sentido transversal as ranhuras de corte e $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ no sentido longitudinal.

Um corpo de prova referência submetido ao ensaio balístico é apresentado na Figura 30. A deformação na superfície do tarugo

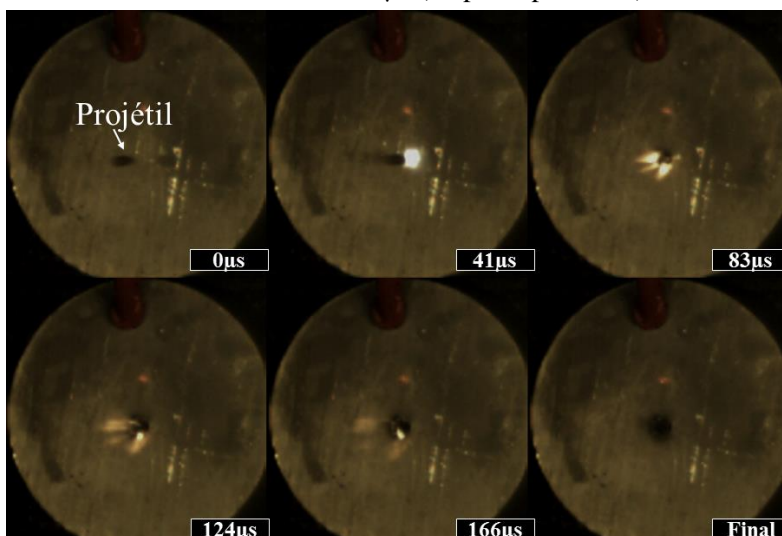
(entrada do orifício) é característica, havendo a formação do fenômeno de “pétalas”. Este comportamento evidencia a ductilidade do alumínio.

Figura 30 - Deformação na superfície do alumínio após o ensaio balístico - efeito "pétala" (corpo de prova R9).



Fonte: O autor, 2016.

Figura 31 - Imagens obtidas com a câmera de alta velocidade em intervalos de 41,6 μ s (corpo de prova R9).

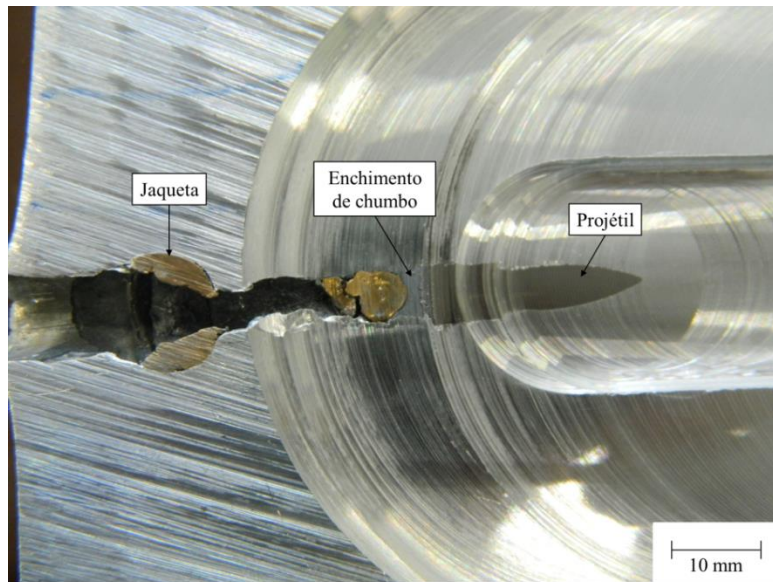


Fonte: O autor, 2016.

Com o choque, espera-se um acréscimo de temperatura (MEYERS, 1994). No teste, o alumínio foi aquecido adiabaticamente por choque do projétil a uma pressão da ordem de 9 GPa (LOPES; SANTOS, 2012). Isto ocasionou um processo muito rápido de fusão e provável vaporização, e subsequente solidificação. Nas imagens obtidas com a câmera de alta velocidade (Figura 31) é possível observar o projétil penetrando no tarugo, sem ocorrer qualquer fragmentação, resultado do aquecimento e deformação plástica local.

Como comentado anteriormente, observou-se o fenômeno de pétala, que evidencia a ductilidade do alumínio. Após o impacto, o projétil penetra no alumínio, alargando o orifício por deformação plástica. Em certo ponto, a jaqueta de latão se desprende do núcleo e é deformada, ficando alojada no início do canal. O núcleo continua a penetração, até que sua velocidade seja reduzida a zero. Na Figura 32 é possível observar os componentes do projétil separados no processo: jaqueta, enchimento de chumbo da base e o núcleo de metal duro.

Figura 32 - Canal de penetração em tarugo seccionado (R5)



Fonte: O autor, 2016.

Os valores de profundidade de penetração nos tarugos monolíticos de alumínio estão apresentados na Tabela 19, juntamente com a velocidade de impacto e dureza Brinell determinadas.

Tabela 19 - Dureza, Velocidade de Impacto e profundidade de penetração dos tarugos de referência.

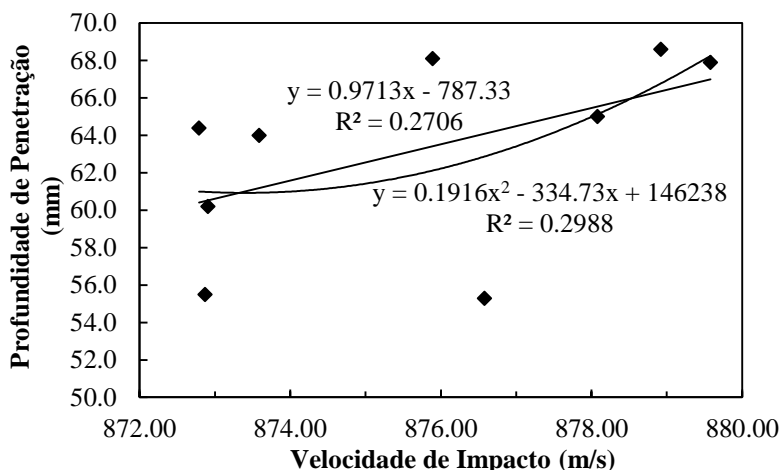
Nome	Dureza Brinell (HB)	Velocidade de Impacto (m/s)	DOP (mm)
R1	65	876,58	55,3
R2	69	872,87	55,5
R3	65	878,92	68,6
R4	70	872,79	64,4
R5	68	873,59	64,0
R6	71	878,08	65,0
R7	68	872,91	60,2
R8	69	875,89	68,1
R9	66	879,58	67,9
Média	68 ± 2	876 ± 2	63 ± 4

Fonte: O autor, 2016.

Observou-se uma variação considerável na profundidade de penetração, sendo a mínima observada de 55 e a máxima de 69 mm. Moynihan et al. (2000) relacionaram a DOP de blocos monolíticos de alumínio com a velocidade de impacto variando de 450 a 900 m/s. Os autores constataram uma boa correlação, podendo-se estimar a DOP para velocidades dentro do intervalo. Os dados de profundidade de penetração vs. velocidade de impacto plotados deste trabalho são apresentados na Figura 33.

Considerando a relação entre as duas variáveis quadrática (com base na literatura), não se constatou correlação. Os dados também não apresentam correlação em um modelo linear. Isso é decorrente da pequena variação total na velocidade de impacto, que foi de 6,79 m/s, muito inferior ao intervalo utilizado pelos autores. Outro ponto a considerar seria o ângulo de desvio da trajetória do projétil, que não foi determinado neste estudo. A variação no ângulo de incidência pode desviar a trajetória do projétil dentro do bloco de alumínio, reduzindo sua profundidade de penetração.

Figura 33 - Profundidade de penetração vs. velocidade de impacto (m/s)



Fonte: O autor, 2016.

A variação na velocidade de impacto, como citado anteriormente, foi muito pequena, não tendo influência direta na profundidade de penetração. Desta forma, considera-se a profundidade de penetração média obtida para os tarugos, de 63 mm, a DOP referência para efeito de cálculo de eficiência balística.

5.3.2 Painéis monolíticos

Na Tabela 20 estão os dados referentes ao ensaio. A variação na velocidade de impacto entre os corpos de prova é pequena. As Figuras 33-38 apresentam os painéis monolíticos MO1, MO2 e MO3 após o ensaio balístico.

O modo fratura para todos os corpos de prova foi característico de impactos a velocidades intermediárias, entre 700 e 3000 m/s, nas quais dois mecanismos estão presentes. Trincas radiais foram visíveis, que são produzidas em impactos a baixa velocidade (dano quase-estático) e o cone de fraturas também foi visualizado (acima de 3000 m/s é o único mecanismo presente), principalmente nos corpos de prova MO2 e MO3 (SHERMAN, 2000). O cone de fratura se desenvolve na superfície de impacto limitando a quantidade da cerâmica que participa da transmissão da carga de impacto para a placa metálica (KRELL; STRASSBURGER, 2007; ZAERA; NAVARRO, 2000).

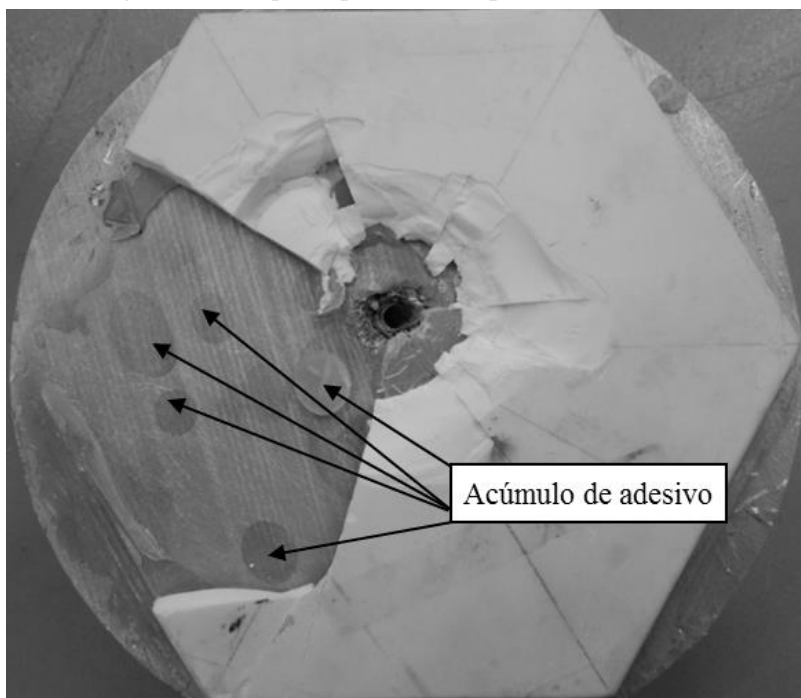
Tabela 20 - Dados do ensaio balístico dos painéis monolíticos.

Painel	Velocidade de Impacto (m/s)	Diâmetro do Dano (mm)	Penetração (mm)
MO1	877,12	200	15
MO2	876,42	88*	0
MO3	883,78	98	0

*Dano desconsiderando a área descolada por deficiência do adesivo.

Fonte: O autor, 2016.

Figura 34 - Corpo de prova MO1 após ensaio balístico.



Fonte: O autor, 2016.

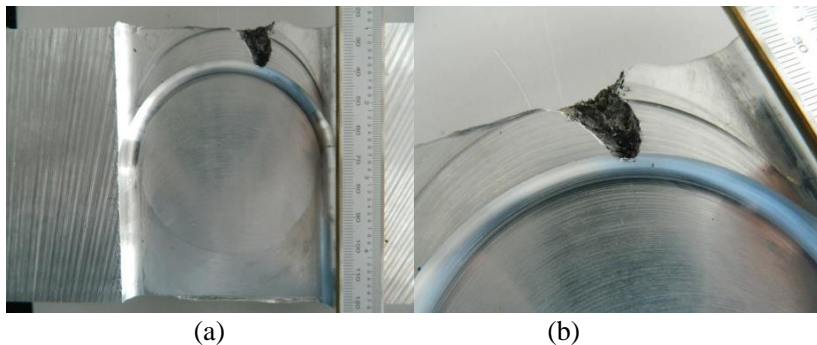
As placas de alumina monolítica apresentaram dano maior do que o esperado, por conta da deficiência na camada adesiva. A falta de planaridade das placas é a causa deste problema. A placa que não apresentava tal defeito mostrou um desempenho significativamente melhor. Desta forma, o desempenho das placas monolíticas de alumina

foi proporcional a sua planaridade e consequentemente à qualidade da camada adesiva.

O corpo de prova MO1 é apresentado na Figura 34, em que se pode observar regiões com marcas arredondadas, onde havia o acúmulo de cola. Ao ser atingido, a fratura foi facilitada pela flexão que a placa de alumina sofreu por não estar bem aderida. O fenômeno mais significativo para que a penetração ocorresse foi o descolamento dos fragmentos, que causou pouca erosão no projétil. A profundidade de penetração medida foi de 15,1 mm. (Figura 35).

Na Figura 36 é possível visualizar a jaqueta do projétil, que ficou retida logo na superfície do tarugo. A formação da deformação em forma de pétala não é visível como nas placas referências, o que é coerente, pois parte da energia cinética do projétil foi dissipada com a fratura e fragmentação da placa, o que resultou em menor deformação na placa de apoio. Poucos fragmentos do núcleo duro do projétil foram encontrados na cavidade resultante, indicando que o fragmento da jaqueta observado é da parte posterior do projétil.

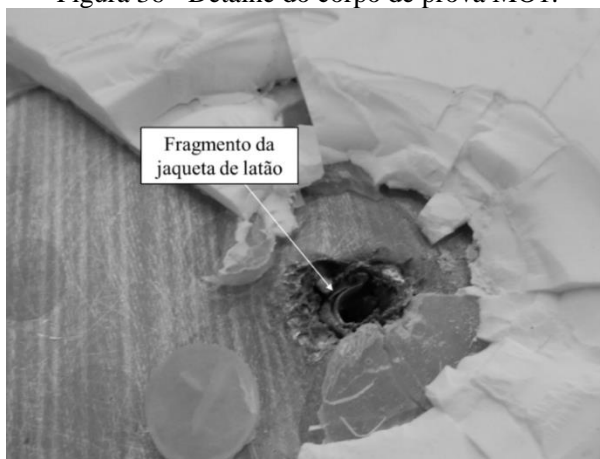
Figura 35 - Tarugo após remoção da placa cerâmica e corte transversal (a) visão geral e (b) detalhe da cavidade.



Fonte : O autor, 2016.

O corpo de prova MO2 (Figura 37) apresentou fratura correspondente à qualidade da camada adesiva. O deslocamento dos fragmentos maiores ocorreu devido à deficiência de cola na região, enquanto que as outras áreas da peça, que não apresentavam este defeito, se mantiveram aderidas. Os fragmentos na região central continuaram aderidos e confinados lateralmente pela parte não fraturada. Isso foi suficiente para erodir o projétil e evitar a penetração.

Figura 36 - Detalhe do corpo de prova MO1.



Fonte: O autor, 2016.

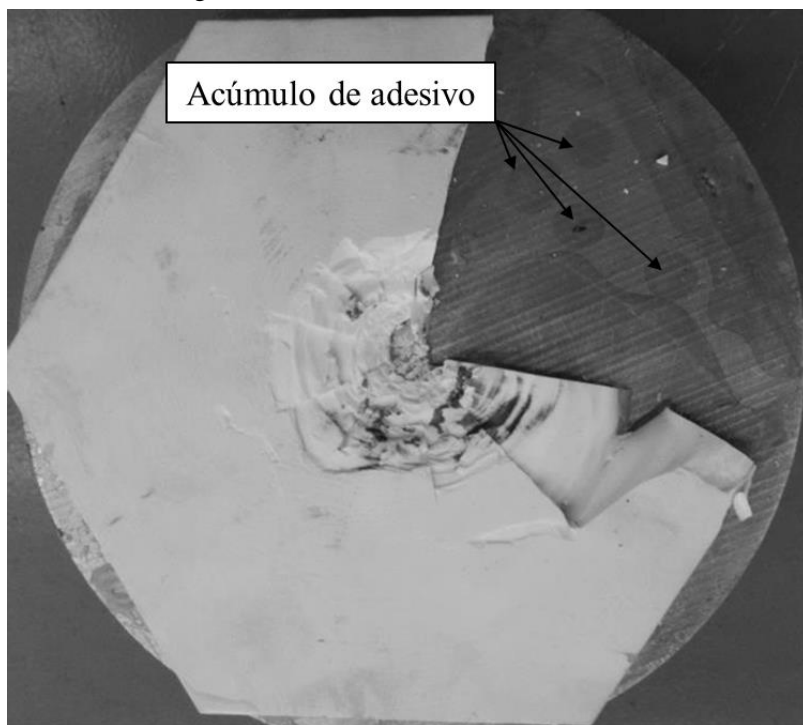
Figura 37 - Corpo de prova MO2 após ensaio balístico.



Fonte: O autor, 2016.

A Figura 38 mostra o corpo de prova MO2 após a remoção dos fragmentos cerâmicos desprendidos do tarugo. O acúmulo de adesivo na região é evidente, assim como observado no corpo de prova anterior.

Figura 38 - Acúmulo de adesivo em MO2.



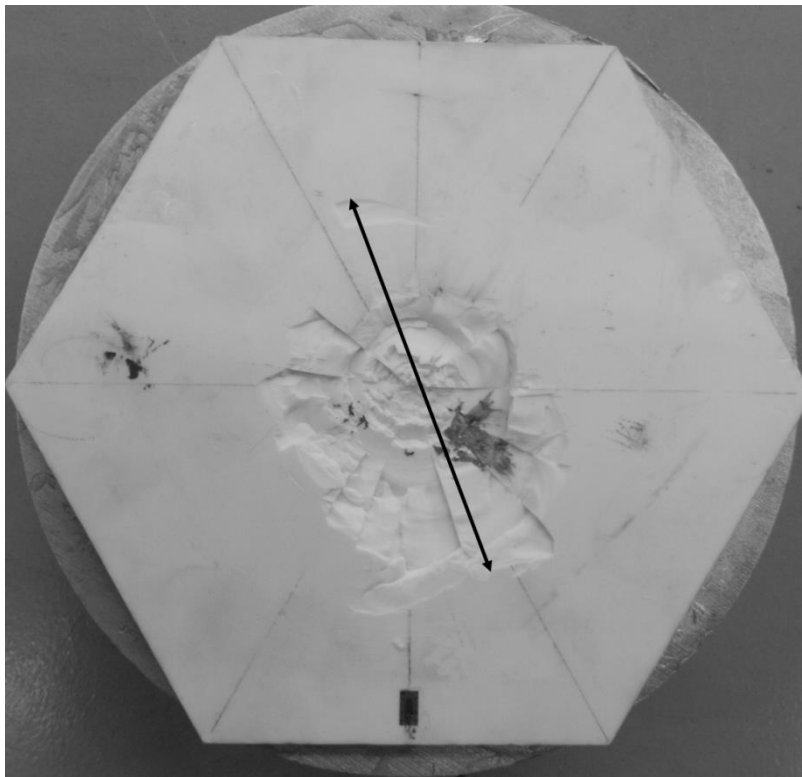
Fonte: O autor, 2016.

Diferente de MO1 e MO2, o último corpo de prova (MO3) apresentava uma boa camada adesiva, a princípio livre de bolhas, pois a peça exibia boa planaridade. Na Figura 39 verifica-se que o dano nesta placa foi bem inferior aos anteriores, sendo que a superfície do tarugo não foi visível em nenhum local após o impacto.

Considerando-se o dano como o diâmetro no qual todas as trincas radiais visíveis na placa estão compreendidas, o dano na placa de alumina do corpo de prova MO3 foi de 98 mm. Entende-se que o corpo de prova MO1 apresentou dano total de 200 mm, pois a trinca radial atingiu a extremidade da placa. Para MO2, desconsiderando-se a região

afetada pela concavidade (deficiência na camada adesiva), o dano foi de 88 mm, similar ao MO3.

Figura 39 - Corpo de prova MO3 após impacto balístico. A seta indica o diâmetro do dano.

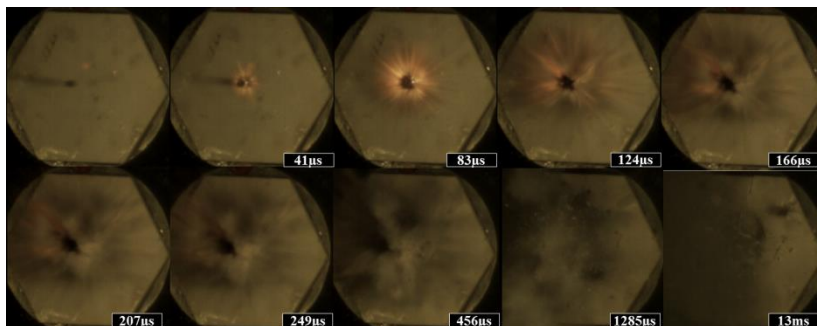


Fonte: O autor, 2016.

A Figura 40 apresenta os quadros obtidos com a câmera de alta velocidade. Os intervalos de aquisição são de $41\mu s$, limite máximo do equipamento sem que a resolução seja comprometida. Comparando as imagens obtidas da placa referência (tarugo de alumínio), com a obtida da placa monolítica, é possível observar a total fragmentação do projétil, que é coerente com a análise do dano na placa, em que não houve penetração. Ainda, verifica-se a nuvem formada (projétil + cerâmica), contendo pó e fragmentos. Nos fragmentos coletados após o impacto,

verificou-se apenas partículas cerâmicas indicando que o projétil foi totalmente destruído.

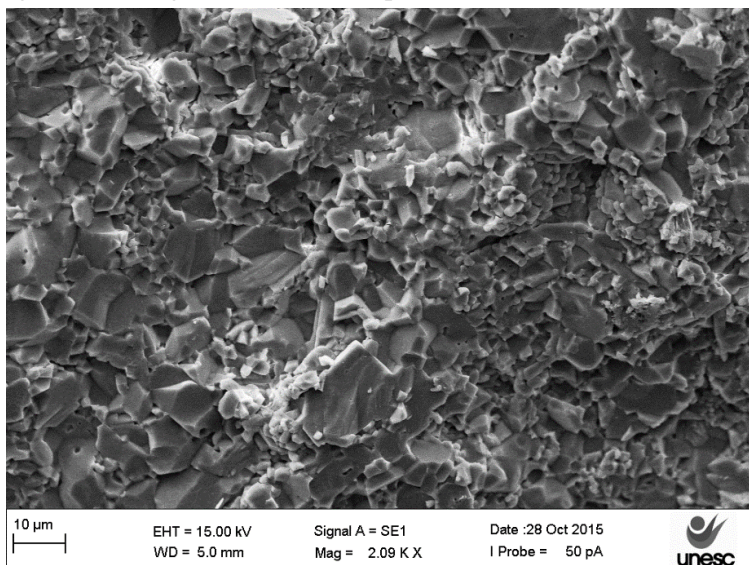
Figura 40 - Imagens obtidas com a câmera de alta velocidade em intervalos de 41,6 μ s (corpo de prova MO2).



Fonte: O autor, 2016.

A imagem de MEV da superfície de fratura da trinca radial é apresentada na Figura 41.

Figura 41 - Imagem de MEV da superfície de fratura da trinca radial.

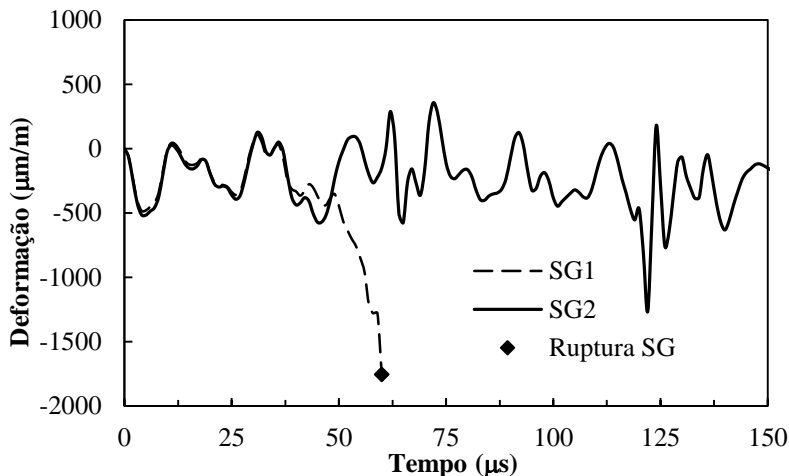


Fonte: O autor, 2016.

O comportamento de fratura verificado é misto, em sua maior parte transgranular. Fraturas em modo I puro (tração) de alumina policristalina exibem comportamento transgranular, o que seria esperado nesta região (SHERMAN; BEN-SHUSHAN, 1998). A existência de fratura intergranular aponta a ocorrência de outros tipos de esforços ou até mesmo a presença de interações fracas no contorno de grão.

Os dados obtidos com os *strain-gages* instalados na superfície da placa são apresentados na Figura 42. Devido à alta frequência de aquisição e grande comprimento do cabo (15 m), o ruído no sinal é considerável. Apesar disso, os dados indicaram uma deformação em compressão antes da ruptura do SG mais próximo. Não verificou-se qualquer sinal no segundo SG. De fato, no ponto onde ele estava instalado a placa se manteve intacta mas, de acordo com o experimento realizado por Naik et al. (2012), poderia ser esperado a onda longitudinal planar neste ponto.

Figura 42 - Dados obtidos com *strain-gages*: corpo de prova MO3.



Fonte: O autor, 2016.

5.3.3 Painéis em mosaico sem material de preenchimento

A Tabela 21 traz as informações do ensaio balístico para esta condição. Da mesma forma que para monolítica, a variação na

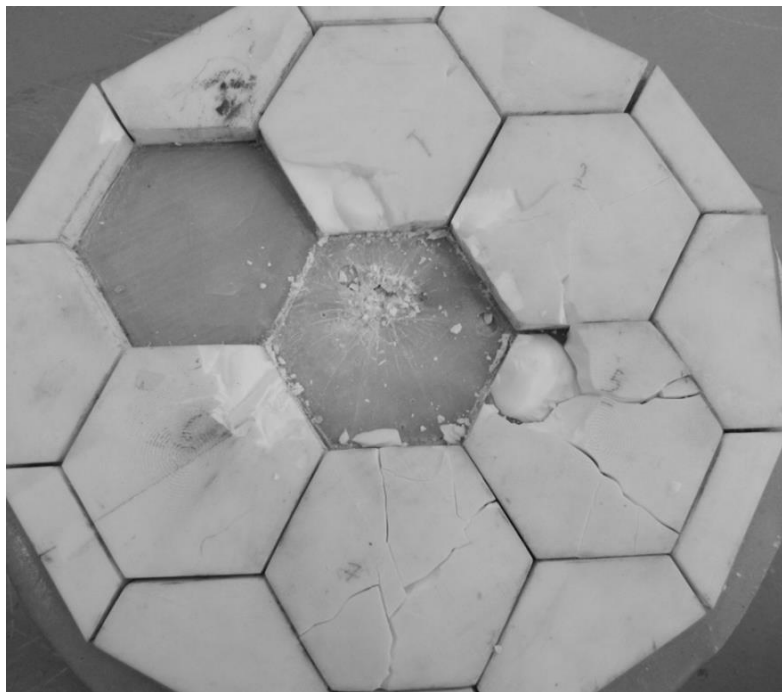
velocidade de impacto é pequena. As Figuras 43, 44 e 45 são referentes aos alvos em mosaico sem preenchimento entre as placas (SP1, SP2 e SP3) após o ensaio balístico.

Tabela 21 - Dados do ensaio balístico dos corpos de prova SP.

Painel	Velocidade de Impacto (m/s)	Diâmetro do Dano (mm)	Penetração (mm)	Placa Atingida Remanescente (% vol)	Espessura do Adesivo (mm)
SP1	875,54	160	0	0	1,0-1,2
SP2	872,75	150	3	0	0,8-1,2
SP3	872,03	115	2	0	-

Fonte: O autor, 2016.

Figura 43 - Corpo de prova SP1 após ensaio balístico.

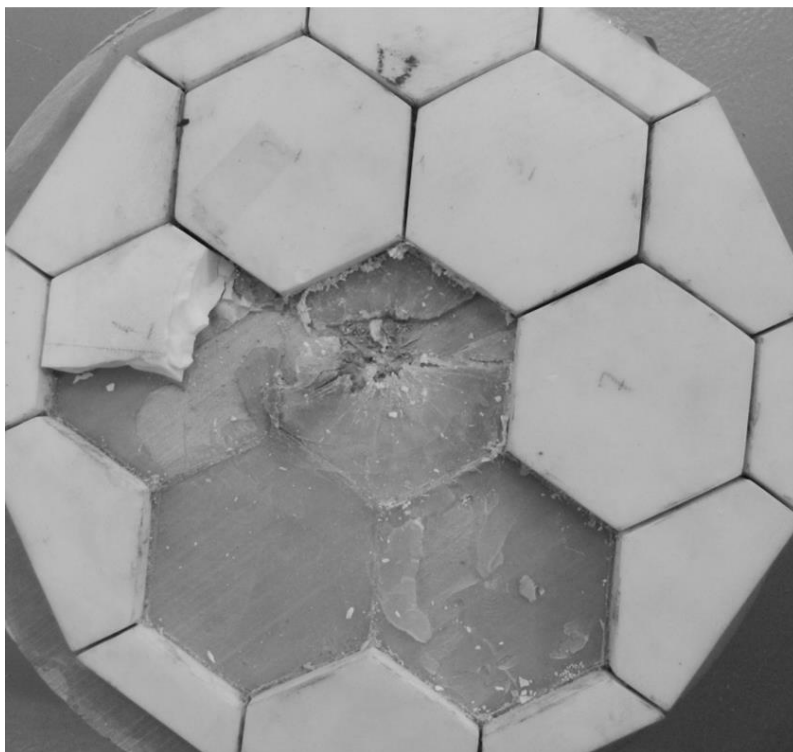


Fonte: O autor, 2016.

Observa-se que em nenhuma delas houve penetração significativa do projétil no tarugo de alumínio. Os danos observados nos corpos de prova 01, 02 e 03 tiveram profundidade de 0, 3 e 2 mm respectivamente. Este desempenho aponta que as dimensões da placa comercial utilizada para confeccionar o mosaico são suficientes para blindagem contra a munição utilizada, comparável ao nível de proteção IV (NIJ 0101.04).

Apesar do bom desempenho quanto à penetração do projétil, o dano nas placas adjacentes foi expressivo. No caso do SP1 (Figura 43), a expansão da placa atingida levou a fratura de todas as seis placas adjacentes, em menor ou maior grau de intensidade, e levou ao descolamento de uma delas. A camada de adesivo média para os painéis, determinada a partir dos que tiveram as placas descoladas, foi de 1,0 mm, espessura comumente adotada em diversos trabalhos.

Figura 44 - Corpo de prova SP2 após ensaio balístico.

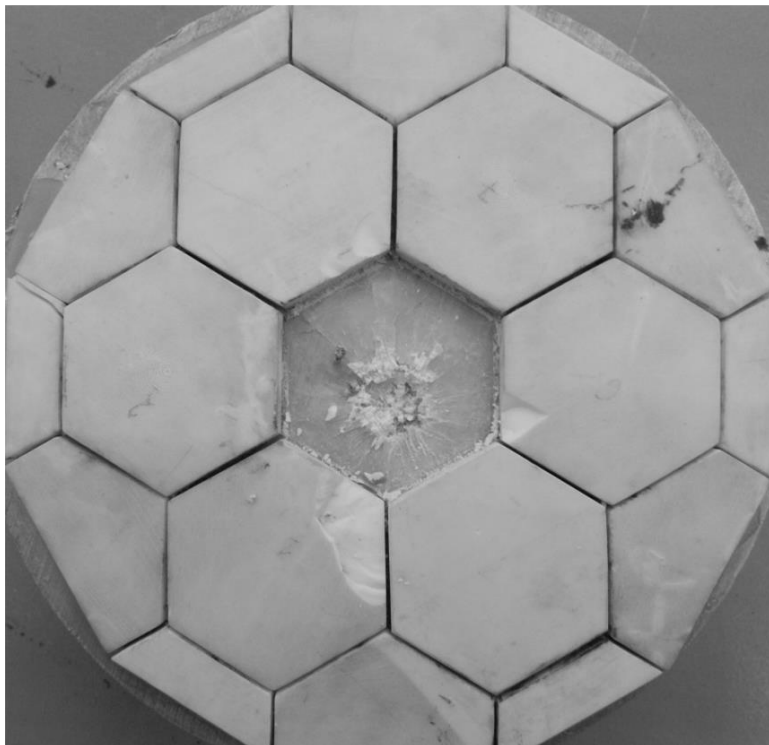


Fonte: O autor, 2016.

Para SP2, três placas adjacentes foram significativamente danificadas, sendo duas delas descoladas completamente da superfície do tarugo, como no corpo de prova anterior. A pequena DOP observada é resultado do esforço compressivo realizado pelo projétil sobre os fragmentos da cerâmica. Não é observada a cavidade característica deste ensaio, e sim “impressões” dos fragmentos empurrados contra o tarugo.

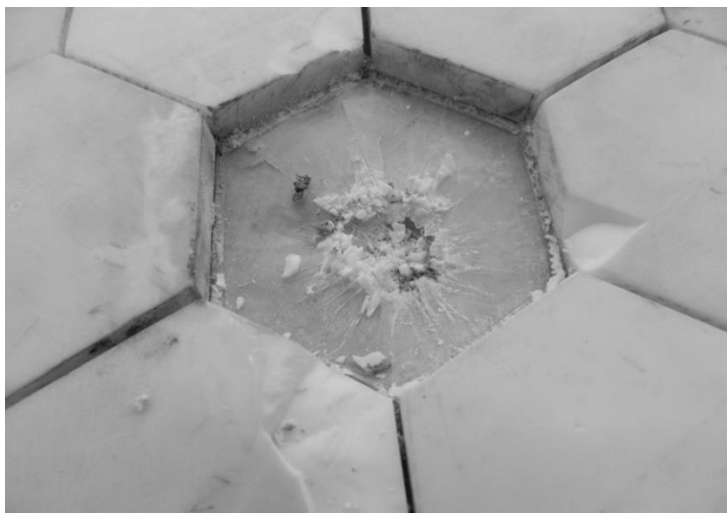
O corpo de prova SP3 (Figura 45) foi o que apresentou dano significativamente menor nas placas adjacentes e pequena penetração (2 mm). A placa atingida foi totalmente destruída, assim como nos outros corpos de prova, mas verifica-se apenas a fratura parcial de três placas próximas (Figura 46). Pouca variação foi observada na velocidade de impacto, portanto o melhor desempenho não pode ser justificado por esta. Uma variação na camada adesiva é mais provável, no entanto esta não pode ser verificada.

Figura 45 - Corpo de prova SP3 após ensaio balístico.



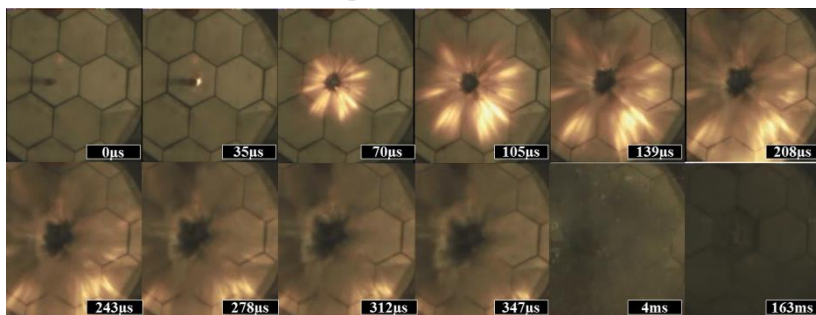
Fonte: O autor, 2016.

Figura 46 - Dano na região atingida pelo projétil.



Fonte: O autor, 2016.

Figura 47 - Imagens obtidas com câmera de alta velocidade (corpo de prova SP3).



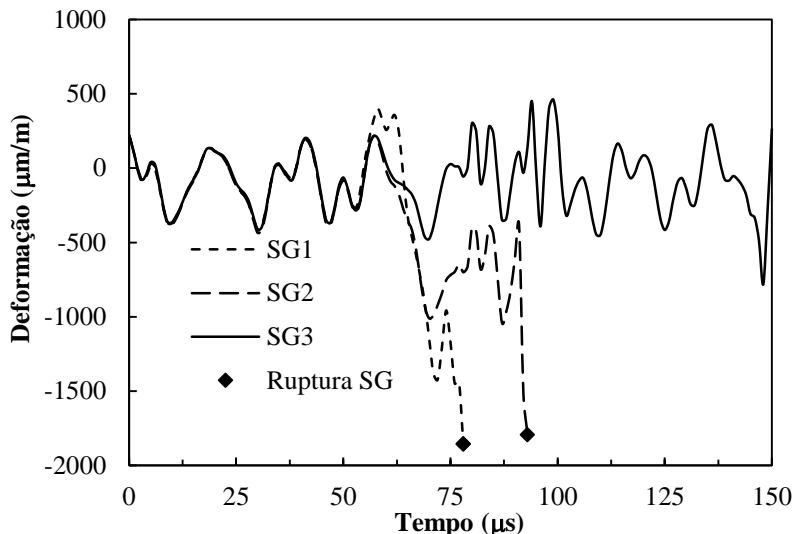
Fonte: O autor, 2016.

As imagens obtidas pela câmera de alta velocidade (Figura 47) mostram uma nuvem de fragmentos com duração de alguns milissegundos, similar à observada na condição monolítica, bem como já reportado na literatura.

O diâmetro máximo do dano para os corpos de prova SP1, SP2 e SP3 foi de 160, 150 e 115 mm, superiores ao observado na placa

monolítica (88 e 98 mm). Isso indica que para a configuração estudada (espessura de placa, dimensões de hexágono, etc.), a aplicação do mosaico não é vantajosa sem a aplicação de material de preenchimento.

Figura 48 - Dados obtidos com *strain-gages*: corpo de prova SP2.



Fonte: O autor, 2016.

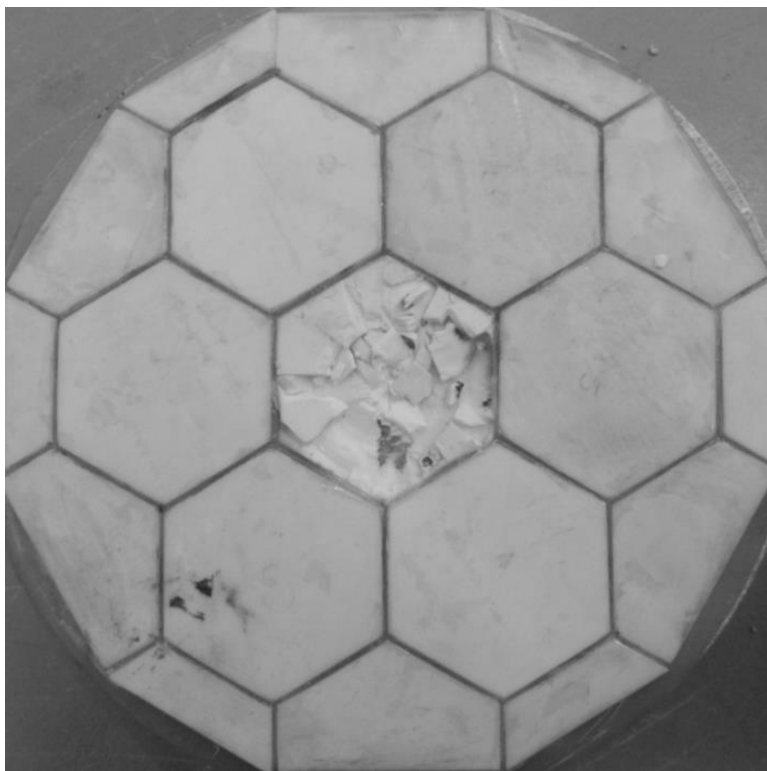
A Figura 48 apresenta o gráfico obtido a partir dos dados extraídos com os *strain-gages*. Observa-se, como para a placa monolítica, uma força compressiva antes da ruptura do primeiro SG. Após um intervalo de aproximadamente 15 μs o segundo SG apresenta o mesmo comportamento. Observando-se o corpo de prova SP2, do qual os dados foram extraídos, a placa em que o segundo SG estava instalado foi destruída. Desta forma, a deformação negativa verificada no gráfico seria relacionada ao impacto que esta placa sofreu após a expansão da placa atingida. O SG3 não captou nenhum sinal de deformação.

5.3.4 Painéis em mosaico com material de preenchimento tipo I

As Figuras 49, 50 e 51 são referentes aos corpos de prova preenchidos com epóxi EP1, EP2 e EP3. Conforme previsões a partir das equações de reflexão e transmissão de onda unidirecional, este material de preenchimento seria responsável pela transmissão de 9% das

ondas planares de tensão. A transmissão de ondas planares para placas adjacentes reduziria a intensidade da onda refletida na borda da cerâmica, reduzindo o dano na fratura. Alguns autores citam que apenas 0,2% da energia do projétil é dissipada no primeiro estágio. Isso sugere que a transmissão talvez tenha pouca interferência no desempenho. Entretanto, se houver menor dano na placa atingida devido à transmissão, maior será a capacidade desta de erodir o projétil. A maior parte da energia (45-70%) é transferida aos fragmentos. Outro fator a considerar é o dano observado na placa monolítica. O diâmetro total do dano em MO3, por exemplo, foi de 98 mm, porém grande parte da zona de impacto na cerâmica permaneceu aderida ao bloco de alumínio. Isso indicaria que pouca energia teria de ser transmitida para as placas adjacentes na configuração em mosaico.

Figura 49 - Corpo de prova EP1 após o ensaio balístico.

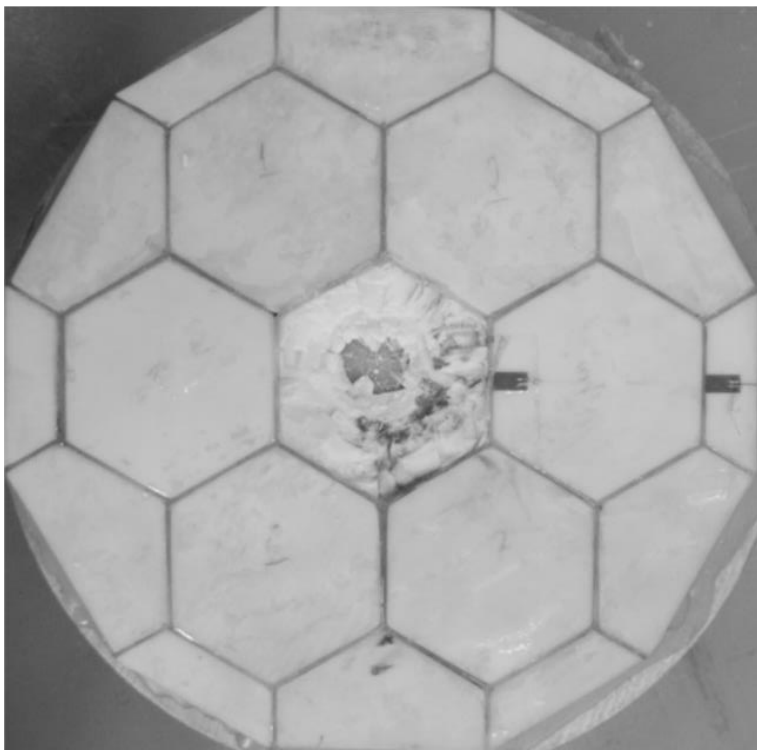


Fonte: O autor, 2016.

De fato, o desempenho para estes painéis foi muito superior aos painéis em mosaico sem aplicação do material de preenchimento. Verifica-se que em todos os painéis, o comportamento foi muito semelhante. O dano foi verificado apenas na placa atingida e, ainda, diferente do mosaico sem preenchimento, grande parte da placa atingida ficou aderida ao bloco de alumínio.

O maior efeito observado com o emprego do material de preenchimento foi no segundo estágio de penetração. Conforme exposto na análise da placa monolítica, a resistência à penetração do painel depende fortemente de sua capacidade de confinar os fragmentos e partículas da cerâmica. Para todos os corpos de prova, as placas adjacentes foram conservadas, não apresentando trincas. A dimensão máxima de dano foi de 60 mm (maior dimensão do hexágono).

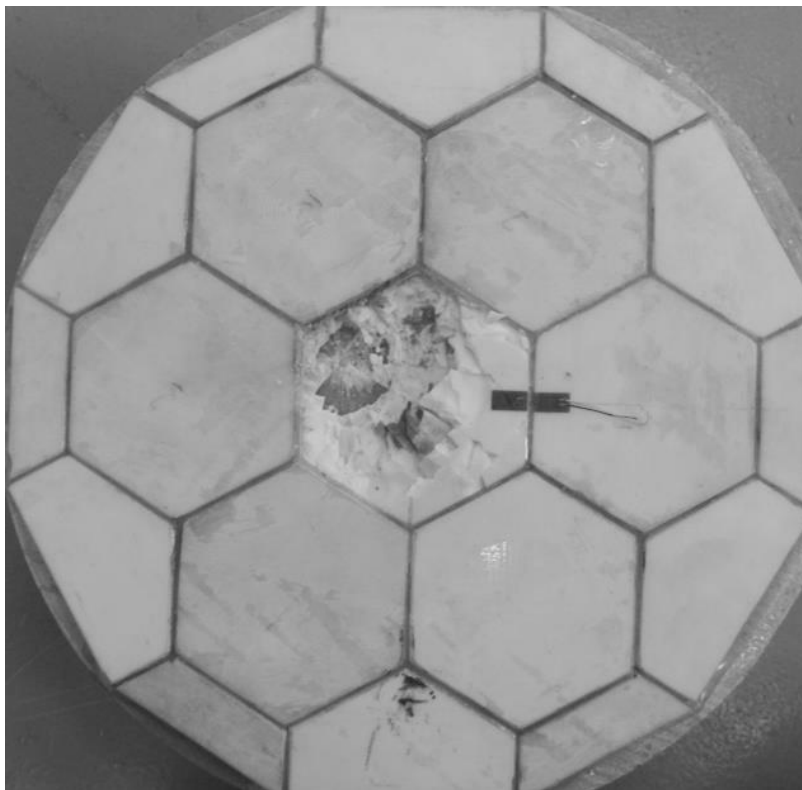
Figura 50 - Corpo de prova EP2 após o ensaio balístico.



Fonte: O autor, 2016.

Alguns métodos de confinamento já foram aplicados. O mais comum é a inserção de placas cerâmicas em tubos ou cavidades metálicas (CHI et al., 2015; ESPINOSA et al., 2000; TAN et al., 2010), que atua nas laterais da placa cerâmica e apresenta uma melhora significativa no desempenho da cerâmica. Este tipo de confinamento, no entanto, poderia ser aplicado apenas para a blindagem como um todo e não para cada placa individualmente. A configuração proposta, com preenchimento de epóxi, promove um confinamento individual das placas.

Figura 51 - Corpo de prova EP3 após o ensaio balístico.



Fonte: O autor, 2016.

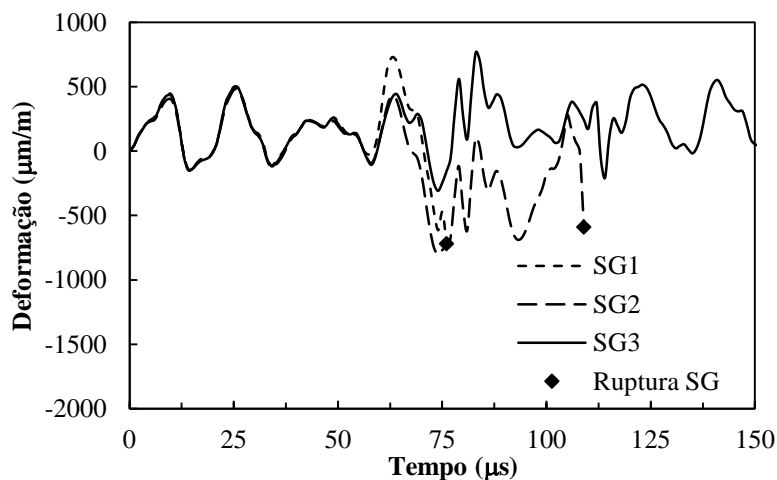
De acordo com o estudo de Bless e Jurick (1998), é muito provável que, em painéis em mosaico, a interface entre placas seja

atingida. Para as condições testadas não foi avaliada a resistência do painel a disparos atingindo a interface. No corpo de prova EP3, no entanto, verifica-se que o ponto em que o projétil atingiu a placa é deslocado do centro, estando a apenas 9 mm da extremidade da placa. Considerando a homogeneidade apresentada por todos os corpos de prova ensaiados, isto indicaria que o tamanho da placa poderia ser reduzido ainda mais, melhorando a capacidade de defesa a múltiplos tiros.

O volume de fragmentos coletados foi bem inferior aos observados nas condições anteriores. Apesar de não ter sido possível utilizar a câmera de alta velocidade nesta condição (devido ao dano causado pelos estilhaços), a pulverização da alumina não foi observada. O mecanismo de fragmentação é importante, pois, a cerâmica pulverizada não é capaz de desgastar o projétil como os fragmentos. Grande parte das placas permaneceu aderida, sugerindo que o desgaste do projétil foi mais eficiente do que na condição anterior (SHERMAN; BEN-SHUSHAN, 1998).

A Figura 52 apresenta os dados obtidos com os SGs para o corpo de prova EP2.

Figura 52 - Dados obtidos com *strain-gages*: corpo de prova EP2.



Fonte: O autor, 2016.

Assim como na condição sem preenchimento, não se observa nenhuma alteração relevante no SG3 (mais distante do ponto de

impacto). Por outro lado, a deformação observada antes da ruptura do SG para o corpo de prova sem preenchimento não é verificada nesta condição. A princípio, concluir-se-ia que nesta condição a placa atingida seria submetida a uma intensidade de onda de tensão menor. Porém, conforme demonstrado por Naik et al. (2008), a deformação esperada na placa seria em tração, ocasionada pela onda planar longitudinal em propagação. Em ambos os casos, monolítica e sem preenchimento, a deformação observada foi negativa, sugerindo esforços compressivos. Essa resposta pode ser resultado de interações entre as ondas ou, até mesmo, dificuldades na leitura, tendo em vista o cenário de obtenção dos dados. Sendo assim, é difícil assegurar que houve um comportamento diferenciado no modo de propagação da onda (reflexão/transmissão), com base nos dados obtidos com os *strain-gages*.

O volume remanescente das placas atingidas foi determinado a partir de modelos de impressão de silicone. Os modelos foram em seguida utilizados para verificação do volume pelo princípio de Arquimedes. Na Figura 53, um dos modelos é apresentado ao lado da placa faturada. A Tabela 22 apresenta os resultados do teste balístico em geral e o volume remanescente da placa atingida. Não foi possível verificar a espessura da camada do adesivo.

Figura 53 - Preenchimento para determinação do volume remanescente da placa atingida.



Fonte: O autor, 2016.

Tabela 22 - Dados do ensaio balístico dos corpos de prova EP.

Painel	Velocidade de Impacto (m/s)	Diâmetro do Dano (mm)	Penetração (mm)	Placa Atingida Remanescente (% vol.)
EP1	876,73	60	0	62
EP2	874,23	60	0	54
EP3	875,54	60	0	59

Fonte: O autor, 2016.

O volume remanescente da placa atingida para os corpos de prova foi de 62, 54 e 59%. Os valores bastante próximos ressaltam a pequena variação no desempenho entre as amostras. No caso da condição sem preenchimento, o melhor resultado destruiu completamente a placa atingida. Desta forma, observa-se uma melhora significativa no desempenho da blindagem com a adição do epóxi entre as placas do mosaico.

5.3.5 Painéis em mosaico com material de preenchimento tipo II

A Tabela 23 apresenta os dados do ensaio balístico. As Figuras 54-56 apresentam os corpos de prova preenchidos com geopolímero após o ensaio e detalhes das interfaces entre preenchimento e alumina.

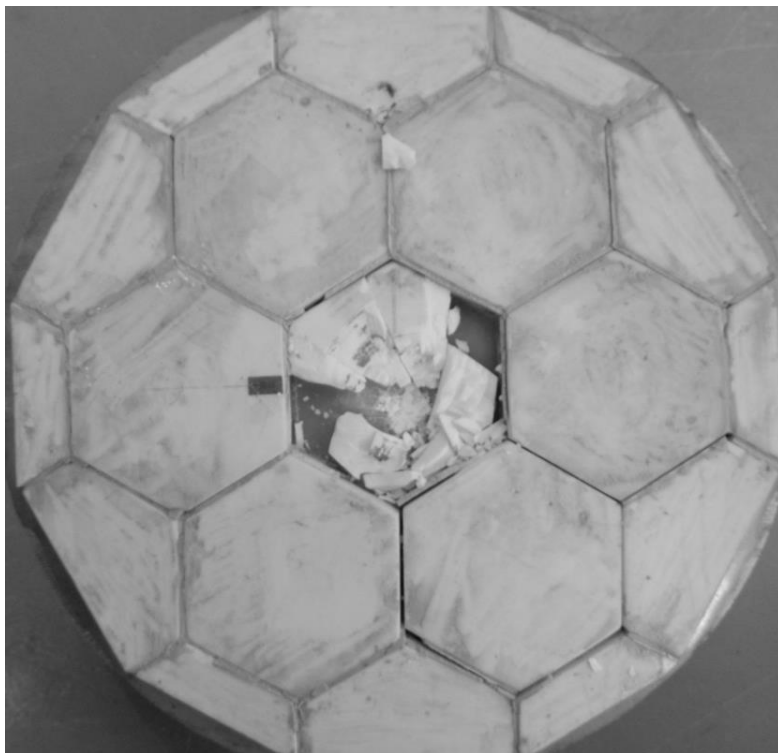
Conforme a previsão, o geopolímero seria responsável pela transmissão de 20% da onda planar de tensão gerada na placa atingida, a princípio resultando em um dano ainda menor na placa em relação ao epóxi. No entanto, este não foi o comportamento observado. A Figura 54 mostra o GP1 submetido ao ensaio balístico. A placa atingida foi totalmente destruída e o material de preenchimento foi danificado ao longo do painel. As placas adjacentes foram preservadas.

Tabela 23 - Dados do ensaio balístico dos corpos de prova GP.

Painel	Velocidade de Impacto (m/s)	Diâmetro do Dano (mm)	Penetração (mm)	Placa Atingida Remanescente (% vol)
GP1	874,89	60	0	0
GP2	878,62	60	9	43
GP3	871,27	95	0	60

Fonte: O autor, 2016.

Figura 54 - Corpo de prova GP1 após ensaio balístico.



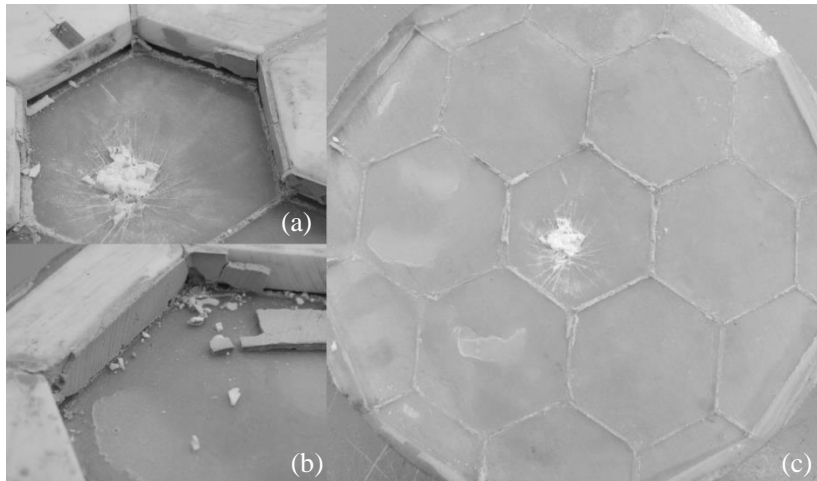
Fonte: O autor, 2016.

Este corpo de prova exibiu um comportamento peculiar. Com base na Figura 55a verifica-se que as placas adjacentes à placa atingida descolaram do apoio. Retirando as placas descoladas, verificou-se que todo o mosaico havia se soltado do bloco (Figura 55c). Já que este material é mais rígido que o epóxi, não deforma tão facilmente e dificulta ainda mais a expansão dos fragmentos. Como resultado, todo o conjunto foi deslocado para frente, para que pudesse ocupar mais espaço.

Na Figura 55b observa-se que o preenchimento realizado com o geopolímero não apresentou defeitos como espaços vazios ou bolhas, porém apresentou trincas, até mesmo no preenchimento entre as placas mais distantes. Constata-se também uma fraca interface entre a placa de alumina e o geopolímero, já que o material se desprende por inteiro. O epóxi apresenta um comportamento diferente. Por ser adesivo e

apresentar boa elasticidade, pode conter melhor os fragmentos e manter a integridade do painel na região não atingida.

Figura 55 - Corpo de prova GP1 após ensaio balístico: (a) Detalhe do descolamento das placas adjacentes; (b) detalhe do painel evidenciando um preenchimento uniforme nas placas mais distantes à atingida (c) painel após retirada da placas descoladas.



Fonte: O autor, 2016.

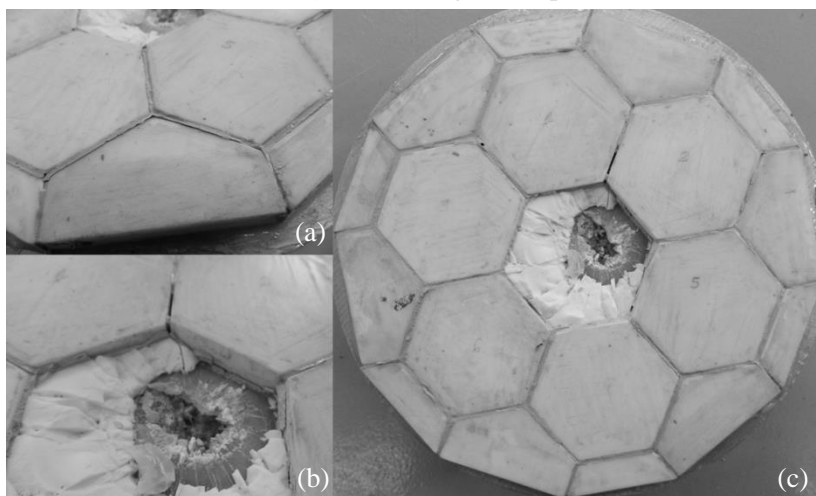
No corpo de prova GP2 o descolamento das placas não foi em toda a extensão do painel, porém algumas destas foram elevadas, sugerindo o mesmo comportamento do corpo de prova anterior. A partir da Figura 56a verifica-se que o geopolímero se desprende das placas após a elevação. A Figura 56b aponta o comprometimento do preenchimento ao redor da placa central. Uma visualização do painel é dada pela Figura 56c.

O painel GP2 apresenta uma cavidade resultante do ensaio balístico, não visível em outros corpos de prova. Neste caso, a penetração foi de 9 mm, sendo o pior cenário dentre todos os corpos de prova testados. Calculando-se a eficiência balística mássica a partir das equações 14 e 15, o valor encontrado foi de 4,7. Em teste realizado por Madhu et al. (2005), para uma alumina 99,5% de pureza, de mesma espessura e condições muito similares de teste balístico (projétil 7,62AP, velocidade de 829 m/s e apoio de alumínio) a eficiência foi de 3,8. O

resultado encontrado neste trabalho é superior ao verificado pelos autores, apontando que a alumina nacional foi mais eficiente.

Outro trabalho realizado por Savio et al. (2014) mostrou resultados de eficiência balística de placas de alumina de 99,5% de pureza nas espessuras de 3, 4, 5 e 6 mm. As eficiências medidas foram de 4,7, 4,8, 5,5 e 5,6, muito próximas da eficiência balística da alumina nacional considerando a penetração zero, de 5,5 (SAVIO; MADHU; GOGIA, 2014). Comparações a partir da eficiência de outras aluminas balísticas não são possíveis devido ao grande número de variáveis envolvidas no teste, que torna difícil encontrar materiais testados sob as mesmas condições.

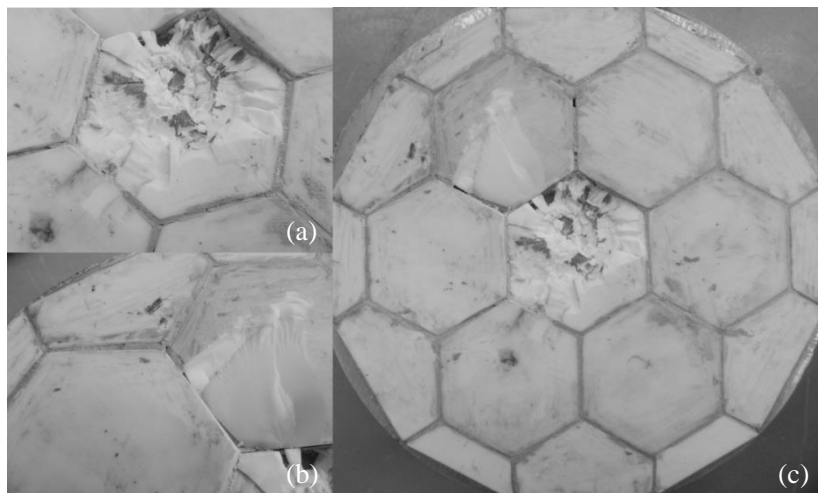
Figura 56 - Corpo de prova GP2 após ensaio balístico: (a e b) Detalhe do defeito na interface preenchimento/alumina após ensaio; (c) Visualização do dano geral no painel.



Fonte: O autor, 2016.

O corpo de prova GP3 também apresentou dano no preenchimento em regiões mais distantes do centro, porém o efeito de deslocamento não foi observado. No entanto, diferente dos painéis GP1 e GP2, este apresentou uma fratura significativa de uma das placas adjacentes. De acordo com a Figura 57c, a placa fraturada é exatamente a adjacente à extremidade mais próxima do ponto de impacto. O comportamento dos painéis preenchidos com geopolímero foi muito diferenciado, não sendo satisfatório para o desempenho balístico.

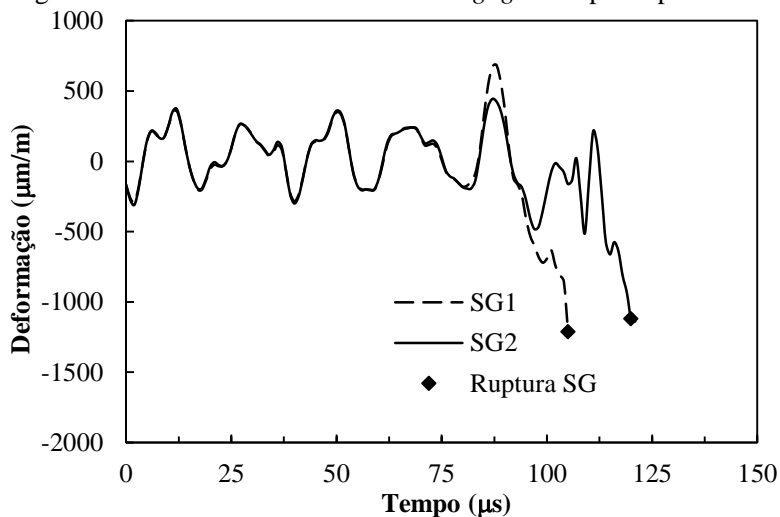
Figura 57 - Corpo de prova GP3 após ensaio balístico: (a) Placa atingida; (b) Dano na placa adjacente (c) Visão geral do painel.



Fonte: O autor, 2016.

A Figura 58 apresenta os dados obtidos com os *strain-gages* para o corpo de prova GP2.

Figura 58 - Dados obtidos com os *strain-gages*: corpo de prova GP2.



Fonte: O autor, 2016.

O comportamento observado é muito similar ao verificado para a condição sem preenchimento. Os dois SGs mais próximos rompem, com uma diferença de 15 μ s, após apresentam um esforço compressivo, que neste caso é de menor intensidade. Não foi possível captar o sinal do SG3 neste corpo de prova.

5.3.6 Comparação entre as condições

Um resumo dos resultados dos ensaios balísticos é apresentado na Tabela 24. A Figura 59 traz imagens das placas atingidas em cada mosaico para melhor comparação. Determinou-se o volume remanescente para o corpo de prova MO3, da mesma forma que para os outros corpos de prova. Considerou-se como volume total um cilindro de diâmetro de 98 mm, mesmo diâmetro considerado como dano.

Tabela 24- Danos nos corpos de prova após ensaio balístico.

Painel	Diâmetro do Dano (mm)	Placa Atingida Remanescente (%)	Penetração (mm)	Espessura do Adesivo (mm)
MO1	200	-	15	-
MO2	88	-	0	-
MO3	98	76	0	-
Média	93*	76*	0*	
SP1	160	0	0	1,0-1,2
SP2	150	0	3	0,8-1,2
SP3	115	0	2	-
Média	142	0	1	
EP1	60	56	0	-
EP2	60	47	0	-
EP3	60	53	0	-
Média	60	52	0	
GP1	60	0	0	0,8-1,1
GP2	60	34	9	-
GP3	95	57	0	-
Média	72	30	3	

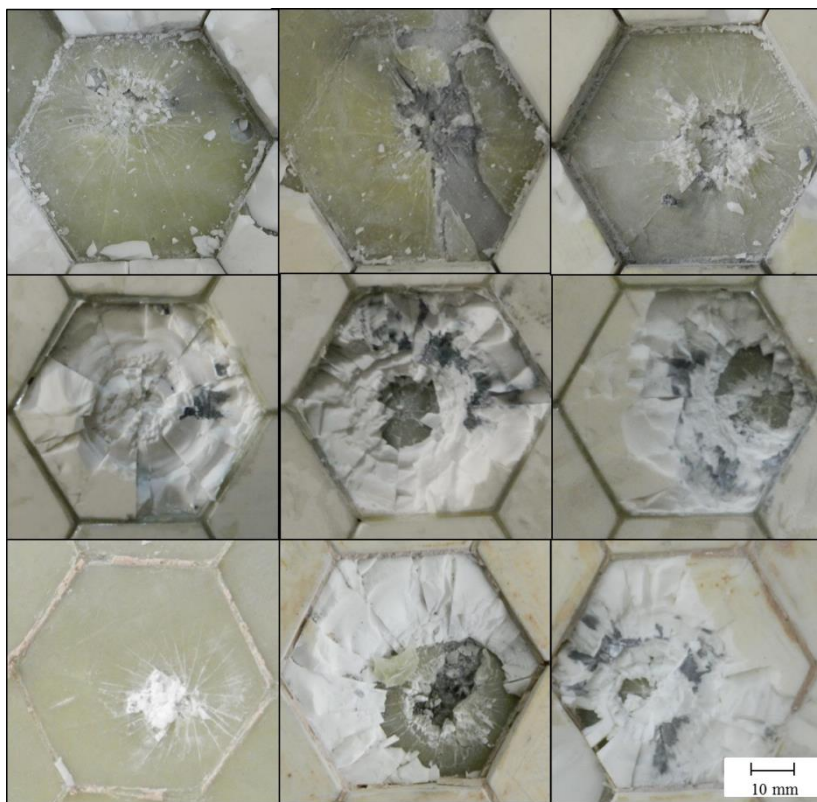
*Desconsiderando MO1.

Fonte: O autor, 2016.

O dano observado no painel monolítico MO1 não é considerado para comparação, pois é resultado da curvatura da placa e consequente

deficiência na camada adesiva. Avaliando-se o percentual de placa atingida remanescente, a condição monolítica apresentou melhor desempenho, pois 76% da placa na região que sofreu dano continuou aderida ao painel. Pode-se facilmente verificar isso na Figura 36, em que não é possível ver a superfície do bloco de alumínio. Entretanto o dano ocorreu em um diâmetro de 98 mm, superior ao tamanho do hexágono utilizado no mosaico.

Figura 59 - Danos nas placas centrais atingidas nos painéis. Primeira linha: SP1, SP2 e SP3; segunda linha: EP1, EP2 e EP3; e terceira linha: GP1, GP2 e GP3.



Fonte: O autor, 2016.

O dano no mosaico sem preenchimento foi significativamente maior que na condição monolítica, apresentando um diâmetro médio de

142 mm. Em dois corpos de prova, as placas adjacentes foram totalmente fraturadas, e no terceiro houve fratura de três placas próximas. Neste caso, o mosaico não seria vantajoso.

Na comparação entre mosaicos, fica nítido que a condição com epóxi foi a que apresentou melhor desempenho, pois o dano foi menor (máxima dimensão do hexágono) e ainda boa parte da placa atingida continuou aderida ao painel (média de 58%). O preenchimento com geopolímero resultou em um desempenho médio superior ao mosaico sem preenchimento. O fato de o *gap* estar preenchido evitou que o contato placa-placa, preservando as placas adjacentes e também tendo maior efeito erosivo no projétil, já que parte das placas atingidas continuou aderida no apoio. A grande variação na integridade do painel após o ensaio prejudica o emprego do mesmo, já que muitas placas descolaram do tarugo.

De modo geral verificou-se que, para as condições testadas, que um material com baixa rigidez e impedância como o epóxi é suficiente para confinar as placas cerâmicas e melhorar o desempenho da blindagem.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho caracterizou-se uma alumina nacional a fim de comparar seu desempenho com aluminas balísticas. Painéis balísticos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ em mosaico com material de preenchimento foram submetidos a testes balísticos e tiveram seu desempenho comparado com a condição sem preenchimento e monolítica.

A alumina nacional estudada, de pureza 99%, mostrou propriedades comparáveis com as diversas aluminas balísticas. Com base nas características medidas, é equivalente a alumina 98% avaliada na literatura.

O estudo dos materiais de preenchimento apontou a resina epóxi sem carga e o geopolímero com quartzo como adequados para as intenções deste trabalho. Ambos apresentaram boa aplicabilidade e impedâncias mecânicas para promover 9 (epóxi) e 20% (geopolímero) de transmissão de ondas.

A espessura da placa de 8 mm se mostrou suficiente para a anulação de um projétil 7,62 perfurante. A profundidade de penetração observada nas placas de apoio (tarugos de alumínio) foi mínima. Considerando penetração zero, a eficiência balística mássica foi de 5,5, muito similar à observada por outros autores nas mesmas condições de ensaios.

A condição monolítica apresentou desempenho comprometido pela concavidade, que afetou a qualidade da camada adesiva. Este comportamento evidenciou a importância de uma camada adesiva sem defeitos para garantir o desempenho da blindagem.

O desempenho dos mosaicos com diferentes condições de preenchimento foi distinto. O uso de mosaico sem preenchimento teve dano superior à blindagem monolítica, não sendo vantajoso. O preenchimento evitou o contato placa-placa e confinou os fragmentos, ocasionando maior erosão ao projétil. Na condição com geopolímero, o comportamento entre os painéis foi heterogêneo. O desempenho médio foi superior ao mosaico sem preenchimento, porém não foi satisfatório. Todos os painéis com epóxi apresentaram um bom resultado ao teste balístico. O epóxi foi mais eficiente que geopolímero, por apresentar elasticidade e adesividade. O material atuou no dano planar sem aumentar a profundidade de penetração, objetivo do trabalho.

Verificou-se que o preenchimento com epóxi, um material de baixo custo e de fácil acesso, foi suficiente para confinar individualmente as placas do mosaico nas condições estudadas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização do presente trabalho são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Verificar o desempenho a múltiplos tiros do painel com preenchimento de epóxi;
- Estudar a influência da distância entre ponto de impacto e interface da placa no dano do painel;
- Testar a própria interface quanto a sua vulnerabilidade balística;
- Aplicar o mosaico em placa de apoio polimérica para verificar o efeito do descasamento de impedância entre cerâmica e apoio.

REFERÊNCIAS

ABPC. Guia Básico de Utilização do Cimento Portland - Boletim Técnico 106 - 7ª Edição. p. 28, 2002.

ADACHI, T. et al. Fracture toughness of nano-and micro-spherical silica-particle-filled epoxy composites. **Acta Materialia**, v. 56, n. 9, p. 2101–2109, 2008.

ANDERSON JR., C. E.; ROYAL-TIMMONS, S. A. Ballistic performance of confined 99.5%-Al₂O₃ ceramic tiles. **International Journal of Impact Engineering**, v. 19, n. 8, p. 703–713, 1997.

ASMANI, M. et al. Influence of porosity on Youngs modulus and poisson's ratio in alumina ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 21, p. 1081–1086, 2001.

BLESS, S. J.; JURICK, D. L. Design for multi-hit capability. **International Journal of Impact Engineering**, v. 21, n. 10, p. 905–908, 1998.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering an introduction**. 8th. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2010.

CARINO, N. J. Stress Wave Propagation Methods. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**, 2004.

CHI, R. et al. Pre-stress effect on confined ceramic armor ballistic performance. **International Journal of Impact Engineering**, v. 84, p. 159–170, 2015.

CHOCRON BENLOULO, I. S.; SÁNCHEZ-GÁLVEZ, V. A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors. **International Journal of Impact Engineering**, v. 21, n. 6, p. 461–471, 1998.

DE ROSSET, W. S. Patterned armor performance evaluation. **International Journal of Impact Engineering**, v. 31, p. 1223–1234, 2005.

DITTANET, P.; PEARSON, R. A. Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy. **Polymer**, v. 53, n. 9, p. 1890–

1905, 2012.

EL-ANWAR, M. I. et al. The effect of luting cement type and thickness on stress distribution in upper premolar implant restored with metal ceramic crowns. **Tanta Dental Journal**, v. 12, n. 1, p. 48–55, 2015.

ESPINOSA, H. . et al. Enhanced ballistic performance of confined multi-layered ceramic targets against long rod penetrators through interface defeat. **International Journal of Solids and Structures**, v. 37, n. 36, p. 4893–4913, 2000.

ESPINOSA, H. D. et al. a Numerical Investigation of Penetration in Multilayered Material/Structure Systems. **International Journal of Solid Structures**, v. 35, n. 22, p. 2975–3001, 1998.

EVANS, A. G. et al. Ultrasonic attenuation in ceramics. **Journal of Applied Physics**, v. 49, n. 5, p. 2669, 1978.

FELI, S.; ASGARI, M. R. Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact. **Composites Part B: Engineering**, v. 42, n. 4, p. 771–780, 2011.

GHOMI, M. **Modelling and Simulation of Elastic & Plastic Behaviour of Propagating Impact Wave**. [s.l.] Mälardalen University, Västerås, Sweden, 2011.

GOEL, R. et al. Stress wave micro–macro attenuation in ceramic plates made of tiles during ballistic impact. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 83, p. 30–37, 2014.

GONÇALVES, D. P. *Análise E Investigação De Impactos Em Blindagem Composta Cerâmica/Metal*. p. 1–107, 2000.

GONÇALVES, D. P. et al. Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 44, n. 2-3, p. 307–316, 2004.

GRUJICIC, M.; PANDURANGAN, B.; D'ENTREMONT, B. The role of adhesive in the ballistic/structural performance of ceramic/polymer-matrix composite hybrid armor. **Materials and Design**, v. 41, p. 380–393, 2012.

HAZELL, P. J. et al. The effect of gilding jacket material on the penetration mechanics of a 7.62 mm armour-piercing projectile. **International Journal of Impact Engineering**, v. 54, p. 11–18, 2013.

HAZELL, P. J.; ROBERSON, C. J.; MOUTINHO, M. The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance. **Materials & Design**, v. 29, n. 8, p. 1497–1503, 2008.

IMANAKA, M. et al. Fracture toughness of spherical silica-filled epoxy adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 21, n. 5, p. 389–396, 2001.

KAUFMANN, C. et al. Influence of Material Properties on the Ballistic Performance of Ceramics for Personal Body Armour. **Shock and Vibration**, v. 10, p. 51–58, 2003.

KRELL, A.; STRASSBURGER, E. Ballistic Strength of Opaque and Transparent Armor A hierarchic order of influences on wear resistance of ceramics is. **American Ceramic Society**, v. 86, n. 4, p. 9201–9207, 2007.

KRELL, A.; STRASSBURGER, E. Order of influences on the ballistic resistance of armor ceramics and single crystals. **Materials Science and Engineering A**, v. 597, p. 422–430, 2014.

LEE, M.; YOO, Y. H. Analysis of ceramic/metal armour systems. **International Journal of Impact Engineering**, v. 25, n. 9, p. 819–829, 2001.

LOPES, J.; SANTOS, D. O. S. **Simulação de ensaio balístico DOP**. [s.l.] Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, RJ, 2012.

LOPEZ-PUENTE, J. et al. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. **International Journal of Impact Engineering**, v. 32, n. 1-4, p. 321–336, 2005.

LYNCH, N. J. et al. The influence of confinement on the penetration of ceramic targets by KE projectiles at 1.8 and 2.6 km/s. **International Journal of Impact Engineering**, v. 33, n. 1-12, p. 390–401, 2006.

MADHU, V. et al. An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact. **International Journal of**

Impact Engineering, v. 32, n. 1-4, p. 337–350, 2005.

MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 1. **Ceramics International**, v. 36, p. 2103–2115, 2010a.

MEDVEDOVSKI, E. Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2. **Ceramics International**, v. 36, n. 7, p. 2117–2127, 2010b.

Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. 1990.

MEYERS, M. A. Dynamic Behavior of Materials. In: **Dynamic Behavior of Materials**. [s.l.] John Willey & Sons Inc., 1994. p. 23–65.

MOTA, J. M. DA. **Desenvolvimento De Compósitos Híbridos Polímero/Cerâmica para Blindagem Balística**. [s.l.] Instituto Tecnológico de Aeronáutica - São José dos Campos, SP, 2010.

MOYNIHAN, T. J.; CHOU, S.-C.; MIHALCIN, A. L. **Application of the depth-of-penetration test methodology to characterize ceramics for personnel protection**. Aberdeen Proving Ground, MD. 2000: [s.n.].

NAIK, N. K.; GOEL, R.; KULKARNI, M. D. Stress wave attenuation in ceramic plates. **Journal of Applied Physics**, v. 103, n. 10, p. 103504, 2008.

PRAKASH, A. et al. Influence of adhesive thickness on high velocity impact performance of ceramic/metal composite targets. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 41, p. 186–197, 2013.

REIJER, P. C. DEN. **Impact on ceramic faced armour**. [s.l.] Technische Universiteit Delft, 1991.

ROTH, W. Scattering of Ultrasonic Radiation in Polycrystalline Metals. **Journal of Applied Physics**, v. 19, n. 19, p. 901–910, 1948.

ROZENBERG, Z.; YESHURUN, Y. The relation between ballistic

efficiency and compressive strength of ceramic tiles. **International journal of impact engineering**, v. 7, n. 3, p. 0–5, 1988.

SARKAR, M.; DANA, K.; DAS, S. Microstructural and phase evolution in metakaolin geopolymers with different activators and added aluminosilicate fillers. **Journal of Molecular Structure**, v. 1098, p. 110–118, 2015.

SASTRY, S. Y. B. . et al. Studies on ballistic impact of the composite panels. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 72, p. 2–12, 2014.

SAVIO, S. G.; MADHU, V.; GOGIA, A. K. Ballistic performance of alumina and zirconia-toughened alumina against 7.62 armour piercing projectile. **Defence Science Journal**, v. 64, n. 5, p. 464–470, 2014.

SHERMAN, D. Impact failure mechanisms in alumina tiles on finite thickness support and the effect of confinement. **International Journal of Impact Engineering**, v. 24, n. 3, p. 313–328, 2000.

SHERMAN, D.; BEN-SHUSHAN, T. Quasi-static impact damage in confined ceramic tiles. **International Journal of Impact Engineering**, v. 21, n. 4, p. 245–265, 1998.

SHOCKEY, D. et al. Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods. **International Journal of Engineering Science**, v. 9, n. 3, p. 263–275, 1990.

SINGH, B. et al. Geopolymer concrete : A review of some recent developments. **Construction & Building Materials**, v. 85, p. 78–90, 2015.

SWAB, J. J. Recommendations for Determining the Hardness of Armor Ceramics. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 1, n. 3, p. 19–25, 2004.

TAN, P. Numerical simulation of the ballistic protection performance of a laminated armor system with pre-existing debonding/delamination. **Composites Part B: Engineering**, v. 59, p. 50–59, 2014.

TAN, Z. H. et al. An investigation on failure mechanisms of ceramic/metal armour subjected to the impact of tungsten projectile.

International Journal of Impact Engineering, v. 37, n. 12, p. 1162–1169, 2010.

TATE, A. A theory for the deceleration of long rods after impact. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 15, n. 6, p. 387–399, 1967.

TILBROOK, M. T.; MOON, R. J.; HOFFMAN, M. On the mechanical properties of alumina–epoxy composites with an interpenetrating network structure. **Materials Science and Engineering: A**, v. 393, n. 1-2, p. 170–178, 2005.

TRINDADE, W. **Influência da geometria e da microestrutura no comportamento dinâmico da alumina aditivada com nióbia**. [s.l.] Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, 2012.

ÜBEYLI, M.; YILDIRIM, R. O.; ÖGEL, B. Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂₀₂₄ laminated composites. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 196, p. 356–364, 2008.

VYSHNYAKOV, L. et al. Influence of structural and technological factors on the efficiency of armor elements based on ceramics. **Strength of materials**, v. 36, n. 6, p. 643–648, 2004.

WANG, B.; LU, G. On the optimisation of two-component plates against ballistic impact. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 57, n. 1-2, p. 141–145, 1996.

WANG, Q.; CHEN, Z.; CHEN, Z. Design and characteristics of hybrid composite armor subjected to projectile impact. **Materials & Design**, v. 46, p. 634–639, 2013.

WARD, N. J. ET AL. (12) United States Patent (10) Patent N6 ; (45) Date of Patent :, 2013.

WESTERLING, L.; LUNDBERG, P. **The influence of confinement on the protective capability of ceramic armour at two different velocities**. Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistics. **Anais...** Jerusalem, Israel: 1995

WILKINS, M. L. MECHANICS OF PENETRATION AND PERFORATION. **International Journal of Engineering Science**, v. 16, p.

793–807, 1978.

WOODWARD, R. L. A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat. **International Journal of Impact Engineering**, v. 9, n. 4, p. 455–474, 1990.

WOODWARD, R. L. et al. A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics. **International Journal of Impact Engineering**, v. 15, n. 5, p. 605–618, 1994.

ZAERA, R.; NAVARRO, C. Modeling of the Adhesive Layer in Mixed Ceramic / Metal Armours Subjected To Impact. **Composites**, v. 31, p. 823–833, 2000.

ZHITNYUK, S. V.; MAKAROV, N. A.; GUSEVA, T. V. New silicon carbide based ceramic armor materials. **Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)**, v. 71, n. 1-2, p. 6–9, 2014.